

**Л.И. ПУПАНЬ**  
**В.И. КОНОНЕНКО**

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ  
МАТЕРИАЛОВ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Л.И. ПУПАНЬ  
В.И. КОНОНЕНКО

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

для студентов всех специальностей  
дневной и заочной форм обучения

Харьков НТУ «ХПИ» 2008

ББК 34.43

П88

УДК 621.7 + 621.9 (075.8)

Рецензенты: *В.В. Пустовалов*, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
Физико-технический институт низких температур  
НАН Украины,

*В.П. Мацюкин*, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
Национальный университет им. В.Н. Каразина

**П88      Пупань Л.И., Кононенко В.И.** Перспективные технологии получения и обработки материалов: Учеб. пособие / Л.И. Пупань, В.И. Кононенко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 261 с.

У навчальному посібнику розглянуто основні перспективні технології виробництва та обробки матеріалів методами лиття, обробки тиском та зварюванням. Викладення матеріалу супроводжується аналізом світових тенденцій, а також специфіки розвитку означених технологій в Україні.

Посібник призначений для студентів усіх спеціальностей денної та заочної форм навчання.

В учебном пособии рассмотрены основные перспективные технологии получения и обработки материалов методами литья, обработки давлением, сварки. Изложение материала сопровождается анализом мировых тенденций, а также специфики развития указанных технологий в Украине.

Пособие предназначено для студентов всех специальностей дневной и заочной форм обучения.

Ил. 84. Табл. 11. Библиогр. 68 назв.

ББК 34.43

© Л.И. Пупань, В.И. Кононенко, 2008

## ВВЕДЕНИЕ

Достижения промышленности в любом развитом обществе неизменно связаны с достижениями в области технологий производства и обработки конструкционных материалов.

Современное машиностроение, являющееся сердцевиной индустрии, характеризуется непрерывным ростом энергонапряженности, экстремальными параметрами (высокими механическими нагрузками, высокими и низкими температурами, агрессивными средами и т.д.). Поэтому во многих случаях только приданием специальных свойств применяемым материалам можно обеспечить надежность и долговечность машин.

Не менее важной задачей является также выбор наиболее рационального, экономичного способа обработки материалов, обеспечивающего высокое качество и производительность изготовления изделий, позволяющего снизить энерго- и материалоемкость, улучшить условия труда. Именно в указанных направлениях и происходит развитие технологий конструкционных материалов, достаточно многообразных по физико-химической природе воздействия на материал, технико-экономическим характеристикам, областям рационального применения.

Некоторые перспективные технологии получения и обработки материалов рассматриваются в данном пособии. Одни из них уже прочно завоёвывали свое место в производстве, другие находятся лишь на стадии научных исследований и разработок и, возможно, получат широкое признание в последующие годы III тысячелетия.

*В первой главе* рассмотрены основные направления совершенствования черной металлургии, перспективы цветной металлургии, состояние металлургического комплекса Украины, новые методы получения металлов, возможности металлургии высокочистых металлов, технологии получения композиционных материалов. Показаны особенности строения и свойств наноматериалов, основные методы их получения и перспективные области применения. Освещены проблемы рециркуляции металлов и ресурсосбережения.

*Во второй главе* представлены основные перспективные направления в литейном производстве. Рассмотрена структура литейного производства и ее наиболее существенные изменения, произошедшие в последние

годы. Отражены тенденции развития технологий точного литья, в том числе деталей сложной конфигурации с высокой точностью и качеством поверхности. Рассмотрены возможности применения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в литейном производстве, технологий ускоренного прототипирования. Представлены методы управления формированием структуры отливок, в том числе в технологиях рео- и тиксолитья. Показаны преимущества способов литья с непрерывным процессом формирования отливки. Дана сравнительная технико-экономическая характеристика различных способов литья и рекомендации по выбору рационального способа.

*Третья глава* посвящена прогрессивным технологиям получения заготовок и деталей методами обработки давлением. Показаны пути совершенствования существующих технологий, в том числе при обработке малопластичных сплавов. Рассмотрены перспективы применения эффекта сверхпластичности, жидкой и полужидкой штамповки, возможности сочетания обработки давлением с другими технологическими процессами. Представлены также методы интенсивной пластической деформации, используемые для получения заготовок из наноструктурных материалов.

*В четвертой главе* рассмотрены перспективы развития одного из ведущих процессов машиностроительного производства – сварочного производства. Показаны основные направления развития техники и технологии традиционных сварочных процессов для повышения качества сварных конструкций и производительности процессов; рассмотрены новые гибридные методы сварки и их технологические возможности. Освещены вопросы контроля качества сварных соединений.

При анализе перспектив развития основных технологий получения и обработки конструкционных материалов анализировались мировые тенденции и особенности развития данных процессов в Украине.

Предлагаемое пособие дополняет лекционный материал по курсам «Технология конструкционных материалов», «Материаловедение и обработка материалов», «Системы технологий», «Материалы в генеративных технологиях» и может быть полезно для студентов всех специальностей дневной и заочной форм обучения.

# 1. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ

*К основным перспективным направлениям развития металлургического производства относятся:*

- совершенствование структуры черной металлургии;
- более широкое внедрение непрерывной разливки стали;
- повышение качества стали путем ее рафинирования;
- бесчугунное производство стали;
- увеличение производства цветных металлов;
- внедрение перспективных технологий получения высокочистых металлов;
- освоение и внедрение нетрадиционных малоотходных методов производства металлов;
- рециркуляция черных и цветных металлов;
- ресурсосбережение и охрана окружающей среды.

Безусловно, перспективными являются также *направления, связанные с разработкой и применением различных методов получения материалов с заранее заданными свойствами, в том числе композиционных материалов; новые технологии производства неметаллических материалов и изделий из них.*

Особые надежды в III тысячелетии возлагаются на *нанотехнологии и наноматериалы.*

Рассмотрим некоторые из этих основных направлений.

## **1.1. Совершенствование структуры мировой черной металлургии. Структура сталеплавильного производства Украины**

Пройдя в своем развитии каменный и бронзовый века, человечество около 4...5 тыс. лет тому назад вступило в век железа, и этот век продолжается по настоящее время. Так, за последние 30 лет человечество добыло железа больше, чем за всю предыдущую историю, а за последние три четверти века производство и потребление стали возросло в 25 раз. И это не случайно. Железо – основа всей современной цивилизации. Без него нет авиации и космонавтики, нет химических заводов и атомных электростанций, нет кибернетики и генной инженерии. Железо, вернее, его сплавы – сталь и чугун – были, есть и в обозримом будущем останутся основными материалами, из которых строят машины и механизмы, мосты и суда, при-

боры и инструменты.

Широкое применение стали и чугуна в качестве конструкционных материалов объясняется следующими факторами: большим распространением железа в земной коре (4,2 %); относительной простотой и низкой себестоимостью производства; способностью изменять свои свойства в результате легирования, термической и термомеханической обработки; благоприятным сочетанием физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств.

В табл. 1.1 приведены усредненные данные по основным механическим свойствам – пределу прочности на растяжение  $\sigma_s$ , условному пределу текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительному удлинению  $\delta$ , а также энергозатратам на производство и стоимости наиболее распространенных в промышленности сплавов.

Таблица 1.1 – Свойства промышленных сплавов (усредненные данные)

Материал	$\sigma_s$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	Энергозатраты на производство, МДж/т		Стоимость, у.е./т
				из ру- ды	из вторич- ных ресур- сов	
Сталь углеродистая	500	300	25	25,2	1,98	350...519
Сталь легированная	2000	1600	10	—	—	1150... 3500
Чугун серый	250	—	0,5	36,0	26,0	300...400
Чугун высоко- прочный и ковкий	750	350	8,5	36,2	26,2	430...450
Алюминиевые сплавы	400	320	18	270	16,6	1500... 3800
Медные сплавы	450	200	32	—	—	3600... 5000
Титановые сплавы	1100	900	14	—	—	15000... 18000
Магниевые сплавы	330	230	12	—	—	1600... 3300

Как видно из табл. 1.1, сочетание основных механических свойств и себестоимости производства для сталей наиболее благоприятно.

Начиная с 2004 г., ежегодное производство стали в мире превышает 1 млрд. т. В 2006 г. мировое производство стали составило более 1,2 млрд. т, табл. 1.2. Лидером по производству стали с 1996 г. является Китай (его доля в производстве стали в мире составляет более 30 %). Мировое производство чугуна в 2006 г. – 860 млн. т.

Таблица 1.2 – Производство стали в различных странах в 2006 г. (данные Международного института чугуна и стали, *IIISI*)

Страна	Всего в мире	Китай	Япония	США	Россия	Юж. Корея	Германия	Индия	<b>Украина</b>	Италия	Бразилия
Производство стали, млн. т	1240	419	116	99	71	48	47	44	<b>41</b>	32	31

В рейтинге 63-х стран – основных производителей стали и чугуна в мире, составленном Международным институтом чугуна и стали (*International Iron & Steel Institute, IISI*), в 2006 г. Украина заняла 8-е место по производству стали (41 млн. т, см. табл. 1.2) и 5-е по производству чугуна (33 млн. т).

Для промышленности Украины, переживающей серьезный технико-экономический кризис, состояние горно-металлургического комплекса в целом и сталеплавильного производства, в частности, имеет огромное значение, так как в настоящее время черная металлургия обеспечивает получение свыше 25 % валового внутреннего продукта и около 43 % валютных поступлений в страну. На экспорт поставляется около 80 % проката черных металлов, что составляет 3 % мировой торговли.

В Украине можно выделить следующие основные регионы черной металлургии: Приднепровье, Донбасс, Приазовье. Благоприятными условиями для развития черной металлургии в Украине являются значительные месторождения коксующихся углей, железных и марганцевых руд, высококачественных известняков, огнеупоров.



В состав горно-металлургического комплекса Украины входит около 400 предприятий и организаций, в том числе 14 металлургических комбинатов полного цикла (обеспечивающих получение чугуна, стали, металлопроката), 10 метизных заводов, 16 коксохимических предприятий, 17 предприятий по производству огнеупоров, 26 горнообогатительных предприятий, 3 ферросплавных заводов, 7 крупных трубных заводов, 20 заводов цветной металлургии, а также 35 предприятий вторичной черной и цветной металлургии.

Крупнейшие предприятия черной металлургии в Украине: ОАО «Миттал Стил Кривой Рог», ОАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», ОАО «Металлургический комбинат «Азовсталь», ОАО «Запорожский металлургический комбинат «Запорожсталь», ОАО «Алчевский металлургический комбинат», ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского» и др.

Как известно, основными металлургическими технологиями производства стали являются: конвертерное производство, мартеновское, способы электроплавки.

Острая борьба на мировом рынке за сбыт продукции вынуждает корпорации и фирмы постоянно улучшать качество стали, снижать затраты на ее производство, что привело к быстрой перестройке всей технологической структуры черной металлургии развитых стран, что выражается, прежде всего, в *уменьшении доли мартеновской стали*, которая играла решающую роль в первой половине XX века, и даже в полном отказе от данной технологии и *увеличении доли конвертерной и электро-стали*, табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Относительная доля стали, выплавляемой различными способами, в общем объеме

Способ производства стали	Относительная доля выплавляемой стали, %	
	Украина	Промышленно развитые зарубежные страны
Кислородно-конвертерный	40...45	60...70
Мартеновский	43...49	—
Электрометаллургия	11...12	30...40

Как видно из табл. 1.3, основная доля стали в экономически развитых странах выплавляется в кислородных конвертерах, которые экономичнее и производительнее мартенов, и в электропечах, причем доля электроласти имеет тенденцию к росту, рис. 1.1.

От энергоемкого и низкопроизводительного мартеновского способа Япония, Германия, США отказались полвека тому назад.

В современном мощном конвертере 350...400 т жидкой стали получают за 30...35 мин, плавка такой же массы в мартене занимает 6...8 часов, т.е. в 12...16 раз дольше. Современные сверхмощные дуговые печи выдают плавку за 50...70 мин, т.е. незначительно уступают конвертеру, обеспечивая несравненно более высокое качество стали.

Однако производство электроласти сопровождается большим расходом электроэнергии, что приводит к повышению себестоимости получаемой стали. Поэтому доля конвертерной стали в ближайшие годы по-прежнему будет стабильно превалировать в общем объеме выплавляемой стали, что является основной тенденцией мировой металлургии стали, см. рис.1.1.

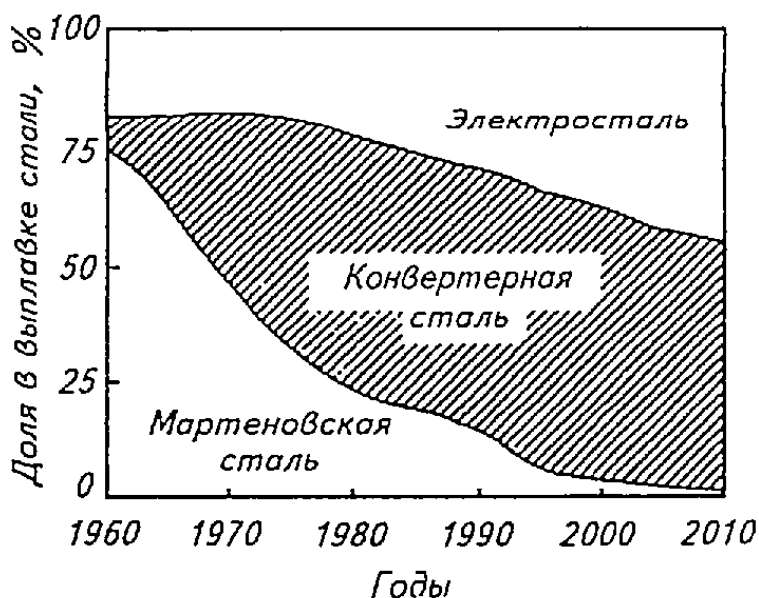


Рисунок 1.1 – Изменение структуры сталеплавильного производства в мире

Структура производства стали в Украине пока далека от оптимальной, см. табл.1.3. Значительная доля стали (до 50 %) выплавляется малопродуктивным и низкоэффективным мартеновским способом. Это объясняется, в первую очередь, существовавшей в предшествующие годы

тенденцией к строительству мощных (емкостью до 900 т) мартеновских печей, реконструкция которых требует существенных капиталовложений.

Отечественными и зарубежными специалистами разработано несколько долгосрочных программ вывода металлургической промышленности Украины из кризиса. Основными направлениями программ являются: оптимизация структуры металлургического производства; использование вторичного сырья; повышение конкурентоспособности продукции путем уменьшения затрат на ее производство, снижение в экспорте доли сырья и полуфабрикатов и увеличение доли готовой продукции; закрытие нерентабельных производств, решение социальных проблем и др.

## **1.2. Бесчугунное производство стали**

Современные способы производства стали базируются на двухстадийной схеме (руда → чугун → сталь), которая сегодня является основной и, несомненно, сохранит свое приоритетное положение в ближайшем будущем.

Доменные печи, в которых реализуется первая стадия данного процесса, т.е. восстановление железных руд до металла и формирование жидкого чугуна, являются весьма производительным агрегатом (обеспечивают до 10 тыс. т жидкого чугуна в сутки); приспособлены к проплавке практически любых встречающихся в природе железных руд; выплавляемый чугун находит свое применение почти без какой-либо дополнительной подготовки. Поэтому доменная печь в настоящее время как весьма экономичный универсальный агрегат высокой производительности не имеет конкурентов.

Однако доменному производству присущи следующие существенные недостатки: необходимость применения достаточно дорогого каменноугольного кокса, использование железорудного сырья в виде достаточно прочного кускового материала (агломерата). Т.е. необходимыми условиями для функционирования доменного производства являются: добыча коксующихся углей, наличие коксохимического производства, обогащение железных руд, агломерационное производство и т.д., что связано с большими затратами времени, труда, энерго- и материальных ресурсов. При этом необходимо учитывать также необходимость решения ряда серъ-

езных экологических проблем, так как до 40 % выбросов в окружающую атмосферу дает именно черная металлургия.

Поэтому во многих странах мира в промышленных масштабах осуществляется производство стали без использования чугуна – на одном ломе или прямым восстановлением из руды.

Под *процессами прямого получения железа* понимают такие химические, электрохимические или химико-термические процессы, которые дают возможность получать железо и сталь непосредственно из железорудных материалов, минуя стадию выплавки чугуна в доменных печах. К основным достоинствам таких технологий относятся:

- возможность использования энергетических углей или природного газа для замены кокса;
- отсутствие зависимости или небольшая зависимость от объединенной энергосистемы;
- отсутствие необходимости тщательной подготовки шихтовых материалов в отличие от доменной плавки;
- наличие небольших производственных агрегатов, обеспечивающих возможность гибкого изменения производства с учетом конъюнктуры;
- возможность создания экологически чистой технологии.

В различных странах существует много патентов и предложений по прямому восстановлению железа из руд, однако немногие из них прошли промышленную проверку и получили реальное воплощение.

Рассмотрим один из наиболее распространенных методов.

Восстановление железа из твердых железорудных материалов взаимодействием с твердыми (уголь) или газообразными восстановителями (природный газ) получило название ***твердофазного восстановления***. В качестве исходных материалов в данном способе используют металлизированные окатыши железорудного концентрата с высоким содержанием железа – до 85...95 %. Металлизацией называют повышение содержания железа в железорудных материалах.

Этот способ выплавки стали состоит из трех основных стадий: приготовления окатышей из железорудного концентрата; металлизации окатышей в специальных установках прямого восстановления железа; выплавки стали из металлизированных окатышей.

Для получения окатышей в цехах окомкования на металлургическом комбинате из обогащенной железной руды (концентрата) на вакуумных

фильтрах удаляется влага, добавляется связующее вещество (бентонит), которое во вращающихся барабанах-окомкователях склеивает частицы концентрата в небольшие шарики диаметром 1...2 см – сырые окатыши. Далее окатыши обжигают на конвейерных машинах для придания им требуемой прочности.

Металлизация окатышей осуществляется на специальных металлизационных установках, рис. 1.2, представляющих собой 64-метровую цилиндрическую башню-печь с внутренним диаметром до 5 м, в которой происходит восстановление железа.

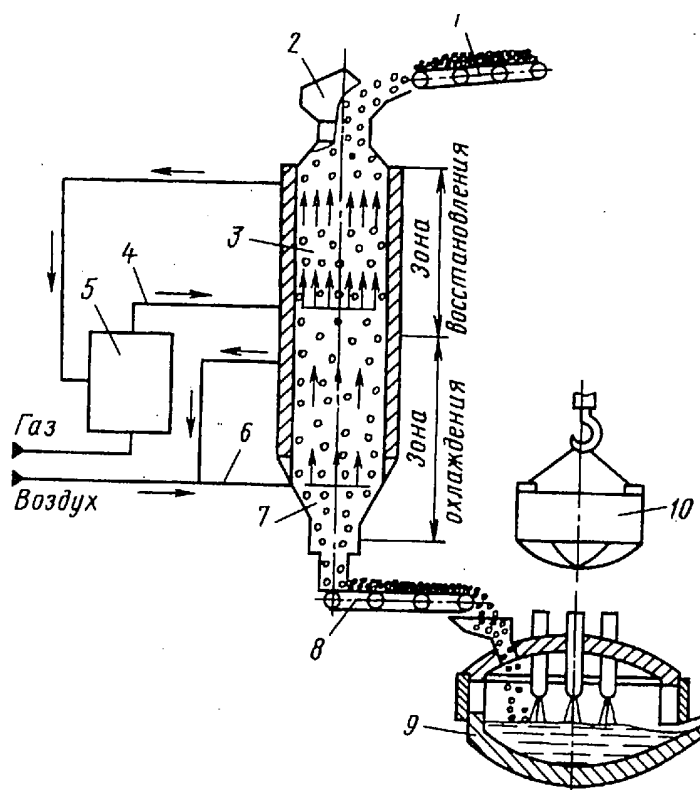


Рисунок 1.2 – Схема прямого производства стали из металлизированных окатышей

Окатыши конвейером 1 подаются в приемное устройство 2 и равномерно загружаются в шахтную башню-печь 3, работающую аналогично доменной печи, по принципу противотока. Для восстановления железа из окатышей в печь по трубопроводу 4 подается восстановительный газ – оксид углерода  $\text{CO}$  и водород  $\text{H}_2$ , полученные разложением смеси природного и колошниковых газов в конверсионной установке 5. В восстановительной зоне шахты, см.рис. 1.2, окатыши при температуре 500...1100 °C

восстанавливаются до губчатого железа (твердого пористого продукта, представляющего собой железо с растворенными в нем углеродом и неметаллическими примесями пустой породы руды). В результате содержание железа в окатышах повышается до 85...95 %. Охлажденные холодным воздухом, подаваемым по трубопроводу 6 в нижней части печи, см. рис. 1.2, окатыши 7 выдаются на конвейер 8 и поступают на выплавку стали.

Выплавка стали производится в электропечах 9. Исходными материалами являются металлизированные окатыши, стальной лом, загружаемый корзиной 10, и ферросплавы. Длительность плавки составляет 2,5...3 часа. Разливка стали осуществляется на машине непрерывного литья заготовок.

Этим способом выплавляют высококачественные легированные стали.

Данный процесс прямого производства стали наиболее распространен в мировой практике (за рубежом известен как способ *MIDREX*, разработан в США). Сегодня в мире данным способом выплавляется 2/3 всего мирового производства стали, получаемой по технологии прямого восстановления железа, или 2 % от мирового производства стали в целом.

К сожалению, ни один из существующих процессов бездоменного производства стали пока не дал желаемого результата. Прямое получение железа из руды – параллельно развивающийся процесс, пока не составляющий конкуренции доменному. Тем не менее, несмотря на сложность этих процессов и технологий, трудности и неудачи при их практической реализации, по мнению ученых-металлургов, именно эти процессы в будущем, возможно, обеспечат прорыв на новый уровень развития металлургии.

### **1.3. Перспективы производства цветных металлов.**

#### **Цветная металлургия Украины**

В современной технике используется около 70 цветных металлов и более 10 тыс. сплавов на их основе. Цветные металлы, хотя и имеют более высокую стоимость и характеризуются меньшими объемами производства по сравнению с черными, тем не менее, находят широкое применение в различных отраслях техники, а в таких отраслях, как электро- и радиотехника, радиоэлектроника, авиация и космическая техника, являются основными конструкционными материалами.

В авиации, ракетостроении, на сухопутном и водном транспорте решающее значение имеет удельная прочность, представляющая собой отношение предела прочности к плотности сплава и численно равная длине прутка, который разрушается под действием собственного веса. По этому показателю алюминиевые, магниевые и особенно титановые сплавы превосходят чугуны и ряд сталей, табл. 1.4. Еще более высоким значением удельной прочности характеризуются композиционные материалы на основе алюминия и магния.

Особенно актуальна проблема увеличения производства цветных металлов для Украины, т.к. пока цветная металлургия не играет такой роли в экономике страны, как черная, и достаточно высокие потребности в цветных металлах удовлетворяются в основном за счет импорта.

В структуре цветной металлургии Украины традиционно выделяются производство алюминия, меди, титаномагниевого производства, никеля, свинца, цинка.

Украинский рынок цветных металлов имеет свою специфику. Структура отрасли украинской цветной металлургии достаточно сложна и объединяет 20 крупных предприятий-производителей 14-ти подотраслей.

Таблица 1.4 – Удельная прочность металлов и сплавов

Материал	Удельная прочность $\sigma_s/\rho$ , км
Сталь углеродистая	7,1
Сталь низколегированная	9,3
Сталь низколегированная термоупрочненная	12,8
Сталь мартенситостареющая	32,0
Чугун серый	2,8
Чугун высокопрочный	6,9
Алюминиевые сплавы	13,0
Алюминиевые композиционные материалы	42,3
Магниевые сплавы	17,3
Магниевые композиционные материалы	54,5
Титановые сплавы	33,3

В Украине есть месторождения цветных металлов, например, Никопольское и крупнейшее в мире Велико-Токмакское месторождения марганцевых руд; Иршанское, Стремигородское, Малышевское месторождения ильменитовых титановых руд; Жиричевское месторождение медных руд; Новоподольское и Полтавское месторождения бишофитовых магниевых руд; месторождения полиметаллических руд; одно из самых больших в мире месторождений скандия и т.д. Однако далеко не все месторождения находятся в стадии разработки. Кроме того, практически нет полных производственных циклов – от добычи до выпуска металлопродукции, исключение составляет производство ртути и драгметаллов.

В связи с этим была принята и действует «Комплексная программа развития цветной металлургии Украины до 2010 г.». Данная программа предусматривает наращивание объемов производства большинства цветных металлов, сокращение импорта цветных металлов для удовлетворения потребностей промышленности, проведение разведки собственных, хотя и не столь богатых руд цветных металлов, с одновременным решением вопросов повышения технического уровня производства, качества продукции и снижения энергоемкости производства.

♦ **Алюминий** сегодня называют вторым по значимости металлом современной техники. Этот металл имеет невысокую температуру плавления ( $T_{пл} = 660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), малый удельный вес ( $\rho = 2,7\text{ г/см}^3$ ), высокую пластичность, высокие электро-и теплопроводность. Кроме того, по распространенности в природе алюминий занимает 1-е место среди металлов (8,8 % от массы земной коры).

Алюминий, который называют летающим и плавающим металлом, широко используется практически во всех отраслях промышленности, наиболее широко в самолето-, судо-, автомобилестроении, строительстве, электротехнике. Согласно прогнозам относительно дальнейшего распространения алюминия в промышленности по различным технологическим характеристикам, ожидается дальнейшее увеличение спроса на этот металл.

Использование профилей из алюминиевых сплавов, полученных методами непрерывного литья заготовок и прокатки, открыло перед строителями возможность создания оптимальных конструкций стеновых панелей, подвесных потолков, дверных блоков, оконных рам и других строительных элементов. Ныне для этих целей расходуется более 2,5 млн. т алюминиевых сплавов.



Значительные количества алюминия в виде листа потребляет сельское хозяйство для строительства зернохранилищ, изготовления различного рода тары, работающей в контакте с молоком, удобрениями, растительной массой и т.д.

Алюминиевая фольга широко используется в пищевой промышленности как гигиенический упаковочный материал. Применение алюминия взамен луженой жести для изготовления консервных банок и крышек позволяет отказаться от остродефицитного олова.

Если применить авиационную технологию в автомобилестроении, то масса легкового автомобиля снизится примерно вдвое, его кузов не будет подвержен коррозии (благодаря высокой коррозионной стойкости алюминия), а главное, в 2 раза сократятся расход горючего и объем вредных выбросов в атмосферу городов. Этот и другие примеры вызывают определенный оптимизм у ряда специалистов, которые утверждают, что в недалеком будущем алюминий станет металлом №1, потеснив железо. При этом, конечно, следует помнить, что энергозатраты на получение из руды 1 т алюминия примерно на порядок выше, чем на получение 1 т стали, см. табл.1.1, что сдерживает темпы увеличения доли алюминиевых сплавов в промышленности.

Ежегодно в мире производится ~ 30 млн. т алюминия, из которых 22...24 млн. т приходится на первичное производство (из глинозема), а остальное – на вторичное (из лома). Крупнейшими производителями алюминия являются США, Россия, Канада, Китай. Динамика мирового производства алюминия представлена на рис. 1.3.

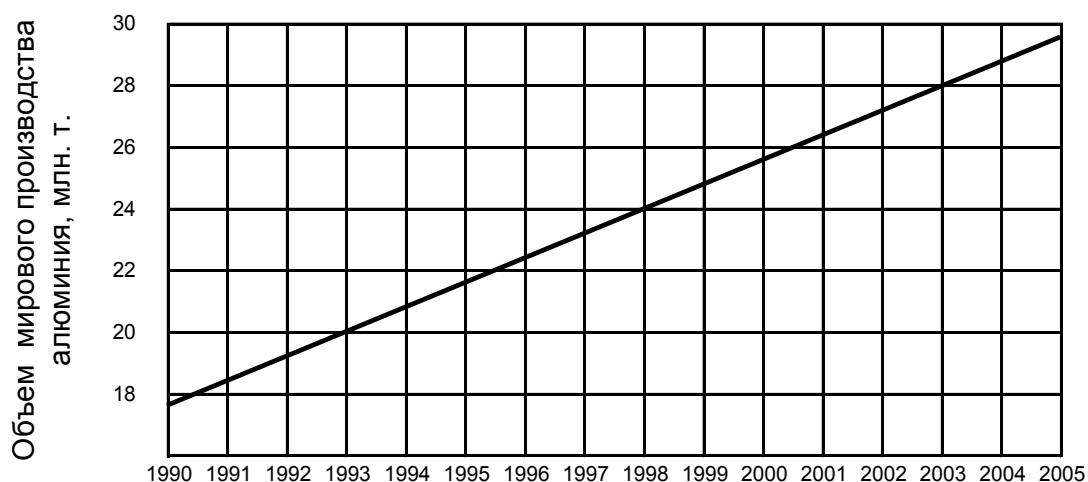


Рисунок 1.3 – Мировое производство алюминия в 1990...2005 гг.

Производство алюминия развивается более интенсивно, чем производство многих других металлов. За последние два десятилетия производство алюминия увеличилось на 92 %, меди – на 60 %, стали – на 46 %, цинка – на 34 %.

Особенностью алюминия по сравнению с другими металлами является также уникальный «цикл жизни» – возможен практически стопроцентный возврат его из сферы потребления в сферу производства, что невозможно для других конструкционных материалов. За последние 10 лет объем мирового производства алюминия увеличился на 65 %, а объем производства первичного металла – только на 27 %. Увеличение доли вторичного металла в товарной продукции приводит к значительному сокращению выбросов токсических веществ. За счет сокращения объемов производства первичного алюминия сокращаются объемы сжигания топлива для получения электроэнергии. Эти существенные преимущества использования вторичного сырья способствуют решению глобальных проблем человечества – энергосбережения и экологической безопасности.

В последующие годы III-го тысячелетия предполагается дальнейшее увеличение производства алюминия и устойчивые темпы развития алюминиевой промышленности, поскольку этот металл является конструкционным материалом высоких технологий, которые радикально и благоприятно изменяют условия жизнеобеспечения человека.

В Украине среднегодовое производство алюминия в начале XXI века составило 113...115 тыс. т и имеет устойчивую тенденцию к росту; исходное сырье – бокситы – импортируются из Гвинеи, Австралии, Бразилии, Гайаны.

Основным производителем первичного и вторичного алюминия в Украине является ОАО «Запорожский производственный алюминиевый комбинат» (ЗАЛК). Производством алюминия и его сплавов занимаются также следующие предприятия: украино-испанское СП «Интерсплав» (вторичный алюминий), ОАО «Николаевский глиноземный завод» (глинозем для дальнейшей переработки в алюминий), ОАО «Артемовский завод по переработке цветных металлов» (прокат из алюминия и его сплавов), Харьковские предприятия АО «Обимет» и АО «Укргермет» (вторичный алюминий).

♦ Весьма перспективным цветным металлом в технике является *титан* и его сплавы благодаря высоким физико-механическим, эксплуатац-

онным и технологическим свойствам.

Сочетание легкости (удельный вес титана  $\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$ ), прочности, термостойкости и высокой коррозионной стойкости выгодно отличает данный металл от спецсталей, алюминиево-магниевых и других сплавов. Равнопрочные титановые детали почти в 5 раз легче, чем из традиционно применяемых материалов. Такие преимущества определили применение титана в XX веке, прежде всего, в бурно развивающейся аэрокосмической промышленности, хотя сразу начались попытки его применения в судостроении, двигателестроении, автомобильной промышленности.

Особенности физико-механических свойств (в частности, высокая химическая активность) обусловили то, что промышленное производство титана началось лишь в середине XX века – путем сложного и дорогого химико-термического процесса восстановления тетрахлорида титана. И, несмотря на многомиллионные инвестиции в разработки, альтернативы данному методу не нашлось до настоящего времени. Поэтому титан остается по-прежнему достаточно дорогим металлом, см. табл. 1.1, и основные области его применения долгие годы определял военно-промышленный комплекс. Например, в конце 70-х годов XX века практически весь годовой объем производства титана в СССР ушел на один проект – использование титана в качестве основного конструкционного материала при производстве ядерной подводной лодки, что позволило на треть снизить ее массу, обеспечить глубоководность, немагнитность и самую большую в мире скорость под водой, до сих пор являющуюся мировым рекордом.

Дороговизна, наукоемкость и снижение ориентации на военные нужды (всю вторую половину XX века титан был «абсолютно военным» металлом) в конце XX века привели к некоторому спаду производства титана в мире.

Однако в последние годы «оживает» авиапромышленность мира, быстро растет производство сталей с титановым легированием, что приводит к увеличению технологических и экономических показателей производства титана. Сегодня ежегодно в мире производится 50...70 тыс. т титана.

Титан и его сплавы используются в авиа- и ракетостроении для изготовления каркасных деталей, обшивки, топливных баков, лопаток компрессоров, деталей реактивных двигателей и т.д.; в судостроении – для обшивки корпусов судов и подводных лодок, для гребных винтов; в хими-

ческой промышленности – для реакторов, насосов, емкостей для агрессивных сред; в медицинской промышленности – для производства инструментов и имплантатов; в пищевой промышленности – для сепараторов, холодильников, емкостей и т.д.

Производство титана имеет наибольший потенциал по развитию в цветной металлургии Украины. В стране имеется полный производственный цикл этого металла, начиная от развитой индустрии по добыче титано-содержащих руд, заканчивая производством готовой продукции на его основе. Производство титана в Украине в первые годы XXI в. составило 4 тыс. т (4-е место в мире). Наряду с США, Японией, Россией, Казахстаном, Украина располагает одним из самых масштабных производств титана в мире.

Лидер по производству титана в Украине – Запорожский титаномагнийевый комбинат. Основными потребителями продукции комбината являются аэрокосмическая отрасль и самолетостроение.

♦ По-прежнему достаточно высок удельный вес в машиностроении металла, открывшего эру металлургии, – *меди* и ее сплавов – латуней, бронз, характеризующихся достаточно высокими механическими, технологическими свойствами и не столь дорогостоящими по сравнению с чистой медью. Сплавы меди обладают высокими литейными свойствами, коррозионной стойкостью, высокими антифрикционными свойствами, высоким сопротивлением износу; применяются для изготовления вкладышей подшипников, червячных колес, шестерен, труб, деталей точных и ответственных приборов.

Сегодня в мире производится ежегодно 17...19 млн. т меди, в 2008 г. ожидается увеличение производства меди до 22 млн. т.

В Украине выпускают, в основном, нерафинированные медные сплавы из лома. Производством меди и медных сплавов занимается довольно значительное количество предприятий. Крупнейшим среди них является ОАО «Артемовский завод по переработке цветных металлов», производящий медный, латунный, медно-никелевый прокат. Переработкой меди и ее сплавов занимаются также предприятия: ГОП «Укркольорпром» (Днепропетровск), АО «Укгермет» (Харьков), ООО «Форум» (Запорожье), СП «Корнер» (Донецк), «Эней» (Киев) и др.

Кстати, в последнее время появились планы начать собственную добычу медных руд в Украине. По данным Госкомгеологии, качество руды,

найденной в Жиричевском месторождении в Волынской области, очень высоко (содержание чистого металла в руде достигает 5,1 %).

В последние годы разработана и действует программа «Медь Украины» по освоению рудных запасов меди и увеличению ее производства.

♦ Малая плотность *магние*вых сплавов ( $\rho = 1,74 \text{ г/см}^3$ ) в сочетании с достаточно высокой удельной прочностью, см. табл.1.4, удовлетворительной коррозионной стойкостью, обрабатываемостью давлением и резанием определили техническую и экономическую целесообразность их применения в авиации, машиностроении, приборостроении, космической технике, в радиотехнике, в полиграфической и текстильной промышленности и т.д. Композиционные материалы на магниевой основе обладают наиболее высокой удельной прочностью среди технических сплавов, см. табл.1.4.

Мировое производство магния – около 700 тыс. т в год.

Производством магния в Украине занимаются в основном два предприятия – Запорожский титаномагнийовый комбинат и ОАО «Концерн «Ориана» (Ивано-Франковская обл.). Оба предприятия испытывают дефицит магниевых сырья – бишофита, в связи с чем в ближайшие годы планируется освоение Новоподольского (Черниговская обл.) и Полтавского месторождений.

Кроме сплавов железа, алюминия, меди, титана, магния, в технике также используются сплавы на основе никеля, хрома, бериллия, вольфрама, молибдена, цинка, свинца и др. металлов, рынок которых непрерывно увеличивается.

#### **1.4. Получение высокочистых металлов и их применение в промышленности**

Одним из перспективных направлений металлургического производства является создание технологий рафинирования металлических материалов и повышения степени их чистоты. Существует самостоятельное направление – металлургия чистых металлов, которые, по сути дела, представляют самостоятельный класс материалов со свойствами, которыми не обладают соответствующие материалы технической чистоты. Именно чистые металлы во многих ситуациях способны проявлять свойства, на осно-

ве которых создаются новые материалы, определяющие прогресс общества. А история развития науки четко прослеживает стремление к повышению чистоты применяемых веществ, возрастающую роль этого фактора в научной и практической деятельности человека.

Чистота металлов оценивается, прежде всего, суммарным содержанием примесей.

Достигнутый уровень чистоты для разных металлов различен. В настоящее время в наиболее чистых металлах суммарное содержание примесей снижено до  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  ат. %. Самые чистые из металлов – Al, Ga, In, Zn, Cd, Hg – содержат  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  ат. % примесей. Больше примесей содержат переходные металлы –  $10^{-1} \dots 10^{-2}$  ат. %, табл. 1.5.

Таблица 1.5 – Показатели чистоты некоторых металлов

Металл	Суммарное содержание примесей, ат. %	Число контролируемых примесей
Fe	$6 \cdot 10^{-3}$	54
Al	$7 \cdot 10^{-5}$	39
Cu	$5 \cdot 10^{-4}$	39
Ti	$6 \cdot 10^{-3}$	54
Mg	$4 \cdot 10^{-2}$	29
Cr	$1 \cdot 10^{-3}$	32
V	$2 \cdot 10^{-3}$	74
Mn	$7 \cdot 10^{-2}$	60
W	$6 \cdot 10^{-3}$	70
Co	$7 \cdot 10^{-4}$	22
Zn	$4 \cdot 10^{-4}$	66
Pb	$6 \cdot 10^{-3}$	40
Cd	$1 \cdot 10^{-4}$	60
Au	$3 \cdot 10^{-3}$	30
Ag	$4 \cdot 10^{-3}$	46
Ga	$6 \cdot 10^{-6}$	62
In	$4 \cdot 10^{-4}$	76

Построение функций распределения примесей по концентрации для отдельных групп металлов, объединенных или по расположению в Периодической системе Д.И. Менделеева или по какому-либо свойству, позволяет выявить общие закономерности их примесного состава, установить группы примесей, определяющие степень чистоты той или иной группы металлов.

В настоящее время установлено, что решающий вклад в величину суммарного содержания примесей в металлах вносят примеси газообразующих элементов: среднее их содержание в образцах металлов находится на уровне  $10^{-4}$  ат. %, в переходных металлах значителен также вклад их химических аналогов и примесей внедрения.

Исследование свойств высокочистых металлов является приоритетной задачей ученых в ближайшем будущем. Без высокочистых металлов невозможно развитие современной техники XXI века. Синтез высокочистых металлов, исследование их свойств и структуры – одно из важнейших направлений в современном материаловедении, не случайно девизом одной из недавних конференций в данной области было: «Чистота – залог прогресса».

К некоторым областям практического применения глубокой очистки металлов от примесей в современной технике можно отнести следующие:

- ▲ расширение круга металлов, используемых в качестве основы при создании новых материалов с заданными свойствами. Например, повышение чистоты скандия, иттрия, "тяжелых" редкоземельных металлов до 99,99...99,999 ат. % делает их пластичными и коррозионностойкими на воздухе при комнатной температуре, позволяет создавать на их основе сплавы конструкционного и функционального назначения;

- ▲ создание дополнительных возможностей для легирования и варьирования свойств;

- ▲ повышение объективности оценки свойств металлов и их соединений, определение новых областей их наиболее эффективного использования.

Понятие чистоты включает наряду с примесным составом и содержание дефектов кристаллического строения (вакансий, дислокаций), которые в ряде случаев могут оказывать даже большее по сравнению с примесями влияние на свойства металлов – физические, механические.

Безусловно, широкое исследование и применение высокочистых материалов невозможно без создания экономичных и производительных ме-

тодов их получения. Поэтому развитию и созданию методов рафинирования материалов уделяется сегодня особое внимание.

Рассмотрим некоторые из них.

Для осуществления глубокой очистки металлов разрабатываются модульные технологии, включающие химические, физико-химические и физические методы. Каждый из них удаляет определенную группу примесей. Включение тех или иных методов в комбинированную схему определяется физико-химическими свойствами рафинируемого металла и требованиями к примесному составу.

Достаточно распространенными и эффективными (например, для производства чистых элементов, используемых при легировании сложных полупроводниковых материалов) являются *химические методы*: *дистилляция* – испарение жидкой фазы, применяется для удаления легкоиспаряющихся примесей; *ректификация* – многократное испарение и конденсация, удаляются примеси, имеющие невысокие температуры плавления, испарения и большой интервал жидкого состояния; *сублимация* – испарение твердой фазы, при этом происходит очищение от механических примесей и газов и получение монокристалла.

Широко в металлургии для очистки от примесей используется метод *электролиза* (при получении меди, алюминия, титана, магния). Более глубокое рафинирование осуществляется с помощью высокотемпературных технологий: вакуумной дистилляции, вакуумно-дугового, электронно-лучевого или плазменного переплава. При этом часто используется эффект зонной очистки.

*Зонная очистка* металла (другие термины – зонная плавка, зонная перекристаллизация, кристаллографический метод рафинирования) заключается в перемещении узкой расплавленной зоны вдоль образца, представляющего собой стержень из рафинируемого металла, рис. 1.4. Движение зоны приводит к расплавлению кристалла с одной стороны и кристаллизации – с другой.

Зонная очистка основана на том, что при равновесии между жидкой и твердой фазами растворимость примесей в жидкой и твердой фазах различна.

Зонной очистке можно подвергать почти все технически важные металлы.



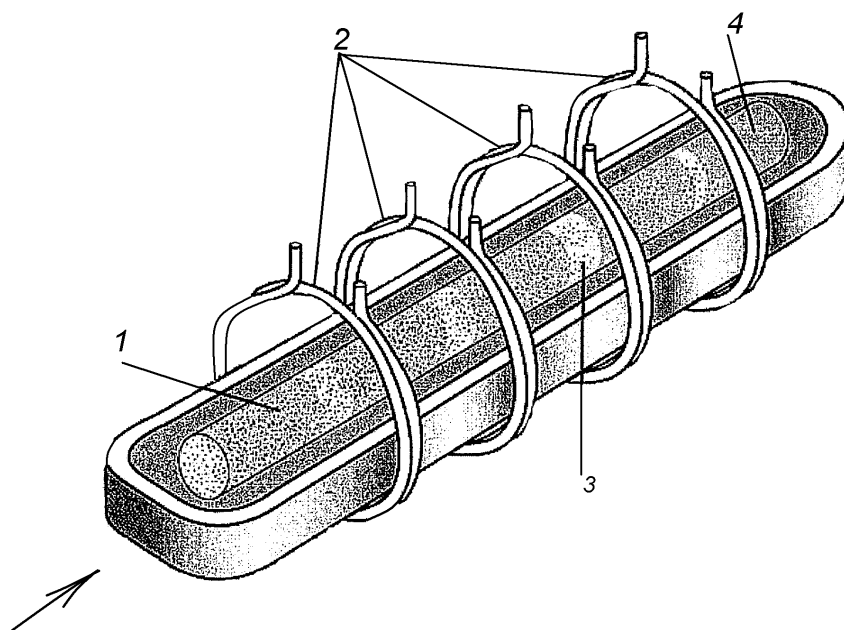


Рисунок 1.4 – Схема зонной очистки:  
 1 – участок образца с примесями; 2 – индукционные нагреватели;  
 3 – расплавленная зона; 4 – чистый металл

Для получения чистых металлов обычно расплавленную зону перемещают по слитку несколько раз или одновременно на слитке создают несколько расплавленных зон с участками твердого материала между ними, перемещающихся в одном направлении, см. рис. 1.4. Каждая зона переносит определенное количество примесей к концу слитка, очищая от них остальную его часть.

В качестве нагревателя для формирования расплавленной зоны обычно используется высокочастотный индуктор, хотя может применяться электронно-лучевой, плазменный или лазерный нагрев.

Скорость перемещения расплавленных зон обычно 0,1...10 мм/мин. Очистку заканчивают при достижении предельного удаления веществ примеси в хвостовую часть образца, которое не может быть изменено последующими перемещениями зон. Зонной очисткой достигается содержание примесей в металлах даже  $10^{-7}$ ... $10^{-8}$  % .

Эффект зонной плавки используется также для легирования металлов, равномерного распределения примеси по слитку (зонное выравнива-

ние), для выращивания монокристаллов, создания эталонов высокой чистоты, исследования диаграмм состояния и т.д.

Зонная плавка достаточно широко применяется для очистки тугоплавких и редких металлов, особенно в сочетании с высокоинтенсивными источниками нагрева – электронно-лучевым, плазменным.

Высокочистые металлы уже сегодня находят применение в электронике, ядерной энергетике, приборостроении, других отраслях.

Например, за последние годы на основе высокочистых редкоземельных металлов (иттрия Y, лантана La и др.) были созданы новые сплавы, в том числе для защиты от радиоактивного излучения приборных отсеков и экипажей атомных субмарин. Ресурсы редкоземельных металлов достаточны для того, чтобы использовать их в металлургии не только как добавки, но и как основу новых сплавов с заданными свойствами.

В последние годы уделяется также внимание разработке и внедрению сплавов на основе ванадия, которые превосходят по удельной прочности многие сплавы титана, пластичны и обладают свойствами, которые делают их перспективными для применения в энергетике.

Другие примеры практического применения высокочистых материалов: изготовление деталей гироскопов из сплава молибден-рений; изготовление фильтров из сплавов палладия для получения высокочистого водорода из отходящих газов химических заводов и металлургических предприятий; создание реакторов с применением высокочистых материалов, совмещающих функции фильтрующих элементов и катализаторов для получения чистых продуктов питания, парфюмерных изделий, медицинских препаратов.

Особый интерес представляют высокочистые металлические монокристаллы, которые отличаются от соответствующих поликристаллических веществ более высокими значениями эрозионной и коррозионной стойкости, бóльшим сопротивлением ползучести, большей технологической пластичностью и др. На основе высокочистых монокристаллов молибдена, вольфрама и их сплавов разработаны материалы для СВЧ-техники (аноды, подогреватели, сетки). Высокая пластичность обеспечила требуемую геометрическую точность приборов, низкое газоотделение, уменьшило запыление и снизило потери мощности; высокая формоустойчивость обеспечила долговечность работы приборов без изменения выходных параметров.

Разработанные методы получения высокочистых материалов (например, метод плазменно-дуговой плавки) позволяют получать, во-первых, монокристаллы повышенной чистоты, даже при использовании исходных материалов с повышенным содержанием примесей; во-вторых, образцы больших размеров – диаметром до 50 мм, длиной до 300 мм, массой до 10 кг. Уже есть принципиальная возможность получать монокристаллы массой до 25 кг, а также крупные профилированные монокристаллы, например, в виде труб, пластин. С помощью данного метода впервые в мире были также получены монокристаллы химических соединений (карбидов, боридов) с температурой плавления выше, чем у вольфрама, самого тугоплавкого металла, что позволяет создавать на основе этих материалов эмиттеры, сверхпроводники, электроды термопар и т.д.

К числу недавних достижений ученых в области создания высокочистых материалов относится также синтез большой группы высокочистых монокристаллов диборидов титана, циркония, ниобия, которые, как оказалось, являются сверхпроводниками, в отличие от этих же соединений технической чистоты.

Другой пример перспективных применений высокочистых материалов – выращивание монокристаллов многокомпонентных твердых растворов железа, что позволит создавать постоянные магниты с высокими магнитными характеристиками и большой температурно-временной стабильностью и применять их в ответственных изделиях современной техники.

Таким образом, применение высокочистых, в том числе монокристаллических, металлов и сплавов позволяет решить ряд принципиальных задач современной техники, является основой для создания новых перспективных функциональных материалов для работы в экстремальных условиях.

Специфика этих материалов заключается также в малотоннажности производства, которое при этом обеспечивает серийный выпуск приборов и конструкций, иногда в количествах, достигающих многих миллионов штук.

Ученым предстоит еще много сделать для более глубокой очистки металлов от примесей, а дополнительные расходы энергетических и материальных ресурсов при этом оправдают себя, так как позволят создавать новые сплавы с уникальными свойствами.

## 1.5. Перспективные технологии получения металлов

Как известно, традиционно применяемыми и достаточно широко распространенными методами производства металлов являются: пирометаллургический (огневой), электрометаллургический, гидрометаллургический и химико-металлургический методы, рассматриваемые в общем курсе "Технология конструкционных материалов".

К перспективным технологиям металлургического производства относятся бактериальное выщелачивание, метод ионитов, плазменный метод, космическая металлургия и др. Безусловно, относительная доля большинства из приведенных методов пока не столь велика, как основных методов получения металлов, и возможно, таковой не станет, однако в ряде случаев их применение экономически оправдано и целесообразно.

▲ **Бактериальное выщелачивание (биовыщелачивание)** предполагает избирательное извлечение металлов из руд, концентратов, горных пород, а также отходов производства с помощью микроорганизмов – бактерий или их метаболитов (промежуточных продуктов обмена веществ в живых клетках).

Метод основан на способности бактерий переводить нерастворимые минеральные соединения в растворимое состояние в водной среде.

Наиболее широко для бактериального выщелачивания применяют тионовые бактерии, единственным источником энергии для жизнедеятельности которых являются процессы окисления сульфидов различных металлов, закисного железа и серы.

В мировой практике в значительных промышленных масштабах технология применяется для извлечения меди, цинка, кадмия, урана, а также золота. Проводятся исследования по бактериальному выщелачиванию ряда других элементов – Mn, As, Co и др.

Для извлечения золота предложено использование гетеротрофных бактерий (использующих для питания готовые органические вещества), выделенных из рудниковых вод золотоносных приисков, а также применение микроскопических грибов.

Проводится поиск новых видов микроорганизмов, способных функционировать не только в кислой, но и в нейтральной и в щелочной средах. Разрабатываются методы использования различных мутагенных факторов для создания бактерий с необходимыми для промышленного применения свойствами непосредственно в рудной массе.

Простота аппаратуры для бактериального выщелачивания, быстрое размножение бактерий, повторное использование отработанных растворов открывают возможность не только снизить себестоимость получения ценных ископаемых, но и значительно увеличить сырьевые ресурсы за счет использования бедных руд, отвалов из отходов обогащения, забалансовых руд, пыли и др.

Метод может быть также применен для извлечения вредных примесей из руд черных и цветных металлов.

В перспективе на основе бактериального выщелачивания возможно создание полностью автоматизированных предприятий по получению металлов из руд непосредственно из недр Земли, минуя сложные горнообогатительные комплексы.

▲ **Метод ионитов** основан на способности ионитов (твердых природных или синтетических веществ, например, синтетических ионнообменных смол) к ионному обмену при контакте с растворами электролитов.

Метод ионитов особенно эффективен для разработки комплексных (полиметаллических) руд, содержащих большое количество разнообразных металлов.

Иониты обладают избирательной способностью: погруженные в соответствующий раствор, забирают из него только один элемент.

Применяя различные иониты, можно извлекать, соответственно, разные элементы.

Метод ионитов достаточно успешно уже используется при получении металлов из морской воды, которую иногда называют «тощей рудой», поскольку в водах Мирового океана растворено около 60-ти элементов таблицы Менделеева, в том числе драгоценные металлы. Так, например,

среднее содержание золота в воде составляет 0,032...0,049 мг на 1 т, а общие запасы в океане – 8...10 млн. т.

С помощью различных видов ионитов из морской воды можно извлекать до 20-ти различных металлов, в том числе медь, железо, алюминий, кальций, магний, серебро, золото и др.

Одним из вариантов реализации данного метода является установка специальных фильтрующих ионнообменных колонок на научно-исследовательских и торговых судах с последующей обработкой содержащегося в них материала в химических лабораториях.

▲ **Плазменный метод** – это получение металлов высокой чистоты и качества в плазменных печах.

Суть метода состоит в переводе оксидов металла в плазму с определенной степенью ионизации с последующим извлечением ионов металла с помощью магнитного поля. Это возможно благодаря тому, что энергия ионизации атомов металлов меньше энергии ионизации атомов кислорода, поэтому атомы металла в плазме ионизируются, а атомы кислорода остаются нейтральными.

Плазменным методом получают вольфрам, молибден и другие металлы.

▲ **Космическая металлургия**, т.е. получение металлов и сплавов в космосе, сегодня по праву может считаться самостоятельным перспективным направлением развития металлургического производства.

Особенностями получения металлов в условиях космоса являются следующие:

- плавление металлов и получение сплавов осуществляется без специальных плавильных агрегатов, так как в космосе не действуют силы тяжести;
- под действием силы поверхностного натяжения расплав приобретает форму шара и свободно висит в пространстве. Используя электромагнитное поле, расплаву можно придать произвольную форму;
- в условиях космоса компоненты сплава хорошо перемешиваются. В случае невесомости газы хорошо растворяются в расплавах, а после кристаллизации получаемые сплавы имеют вид губки с равномерно распре-

ленными ячейками, заполненными газом. Такие сплавы называют *"металлогАЗами"*. Они имеют чрезвычайно низкую плотность и могут содержать до 90 % газов, остальное – сталь. МеталлогАЗы весьма перспективны для самолето- и ракетостроения, а также космической техники.

▲ *"Атомная" ("ядерная") металлургия* основана на использовании в металлургических процессах энергии ядерных реакторов. В настоящее время имеется ряд вполне реальных предложений и проектов, связанных с реализацией этой идеи. В большинстве из них рассматриваются варианты использования тепла ядерных реакторов для проведения операций твердофазного восстановления железа, т.е. процессов прямого получения железа из руд в условиях, когда и сырье – железная руда или железзорудный концентрат, и продукт представляют собой твердую фазу, см. п. 1.2.

## **1.6. Методы производства композиционных материалов**

Одним из важнейших достижений конструкционного материаловедения является создание материалов с заранее заданными свойствами, среди которых важнейшая роль принадлежит композиционным материалам.

*Композиционными* называют материалы, образованные объемным сочетанием двух или более химически разнородных компонентов с четкой границей раздела между ними. Композиционные материалы характеризуются свойствами, которыми не обладает ни один из компонентов, взятый в отдельности.

Отличительной особенностью композиционных материалов является проявление достоинств компонентов при подавлении их недостатков. Для оптимизации свойств композиций выбирают компоненты с резко отличающимися, но дополняющими свойствами. Свойства композиционных материалов зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и от прочности связи между ними.

Композиционные материалы по удельным характеристикам прочности и жесткости, сопротивлению усталостному разрушению и другим свойствам значительно превосходят все известные конструкционные сплавы, рис. 1.5, см. табл. 1.4.

Уровень заданного комплекса свойств композиционных материалов проектируется заранее и реализуется в процессе их изготовления. При этом композиционным материалам придают по возможности форму, максимально приближающуюся к форме готовых деталей и даже отдельных узлов конструкции. Таким образом, особенностью создания конструкций из композиционных материалов, в отличие от конструкций из традиционных материалов, является то, что создание материала, разработка технологического процесса изготовления и проектирования самой конструкции – единый взаимосвязанный процесс.

Наглядным подтверждением широкого применения композиционных материалов в последние годы является увеличение их доли в общем балансе применяемых материалов в самолетостроении, рис. 1.6.

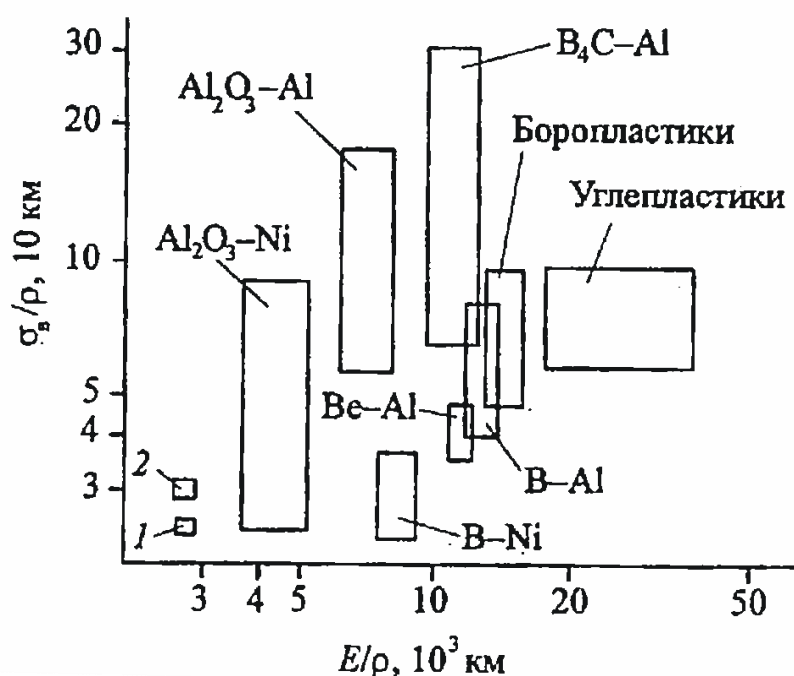


Рисунок 1.5 – Удельная прочность ( $\sigma_b/\rho$ ) и удельный модуль упругости ( $E/\rho$ ) различных материалов:  
1 – алюминий; 2 – сталь и титан



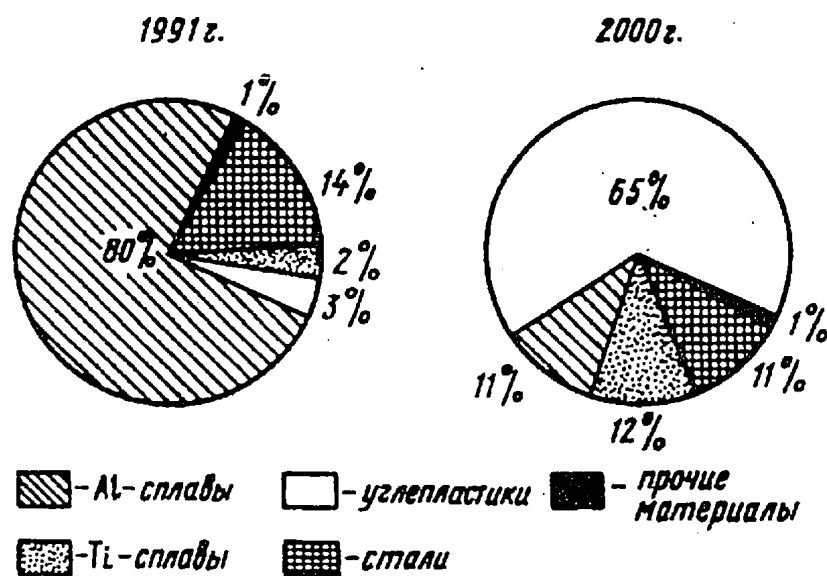


Рисунок 1.6 – Структура баланса используемых материалов в самолетостроении

Компоненты композиционного материала различны по геометрическому признаку. В строении композиционного материала выделяют матрицу (связующее) и армирующий компонент (наполнитель). Компонент, обладающий непрерывностью по всему объему, является матрицей. Матрица связывает композицию в единое целое и позволяет изготовить необходимую инженерную конструкцию. Компонент прерывный, разделенный в объеме композиционного материала, считается армирующим или упрочняющим.

Армирующие или упрочняющие компоненты, как правило, обладают высокой прочностью, твердостью и модулем упругости и по этим показателям значительно превосходят матрицу. Более широким понятием, чем армирующий или упрочняющий компонент, является термин «наполнитель», поскольку наполнитель в матрице, помимо изменения прочности, оказывает влияние и на другие характеристики.

В качестве матрицы в композиционных материалах могут быть использованы металлы и их сплавы, а также органические и неорганические полимеры, керамические, углеродные и другие материалы. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и ее эксплуатационные характеристики, такие, как рабочая температура, сопротивление воздействию окружающей среды, а также параметры

плотности, сопротивление усталостному разрушению, удельную прочность.

Композиционные материалы классифицируют по геометрии наполнителя, по схеме расположения его в матрице (по схеме армирования) и по природе компонентов.

**По геометрии наполнителя** различают: композиционные материалы с нульмерным наполнителем, их называют дисперсно-упрочненными, рис. 1.7, а; композиционные материалы с одномерным наполнителем – волокнистые, рис. 1.7, б; композиционные материалы с двумерным наполнителем – слоистые, рис. 1.7, в.

**По типу матрицы** композиционные материалы подразделяют на композиты с металлической и неметаллической матрицей.

**По схеме армирования** композиционные материалы подразделяют на три группы: с одноосным, двухосным и трехосным армированием. Данные схемы армирования для одномерного наполнителя приведены на рис. 1.8.

Композиционные материалы, состоящие из различных по природе матриц в виде чередующихся слоев, называются *полиматричными*, рис. 1.9, а. Композиты, содержащие два или более различных по природе наполнителя, называют *полиармированными*, рис. 1.9, б.

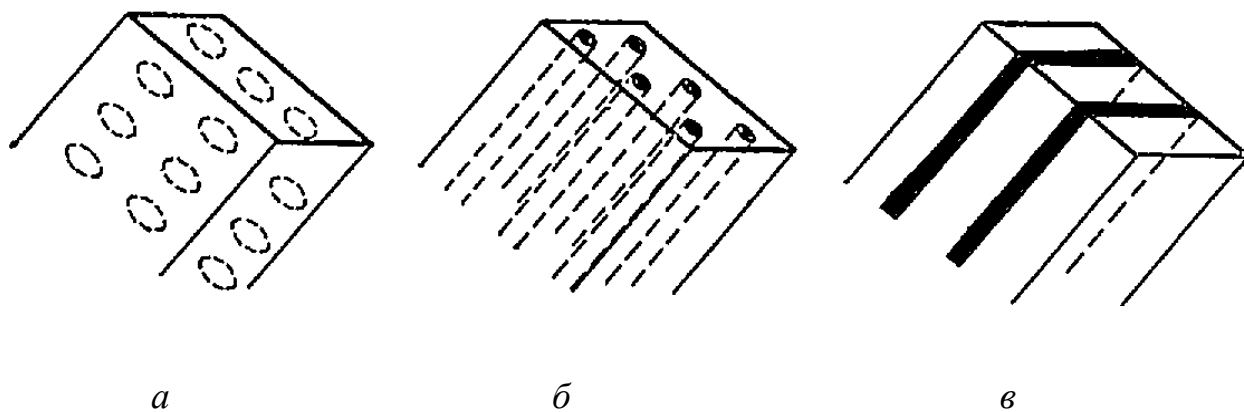


Рисунок 1.7 – Схемы композиционных материалов с различными по форме наполнителями:

а – дисперсно-упрочненные композиционные материалы;  
б – волокнистые; в – слоистые

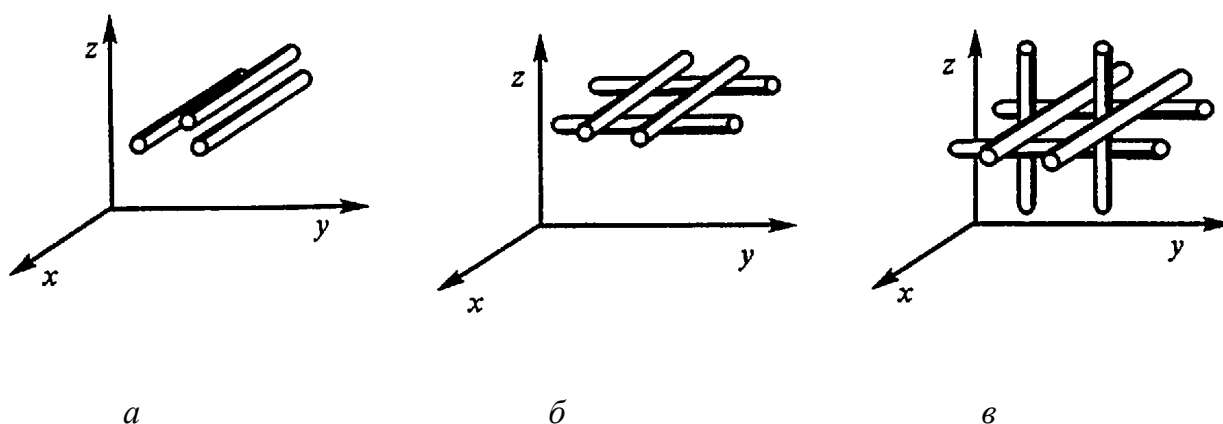


Рисунок 1.8 – Схемы армирования композиционных материалов:  
*a* – одноосная; *б* – двухосная; *в* – трехосная

Полиматричные и полиармированные композиты обладают более широким спектром физико-механических и эксплуатационных свойств по сравнению с однородными по материалу матрицы или наполнителя композитами.

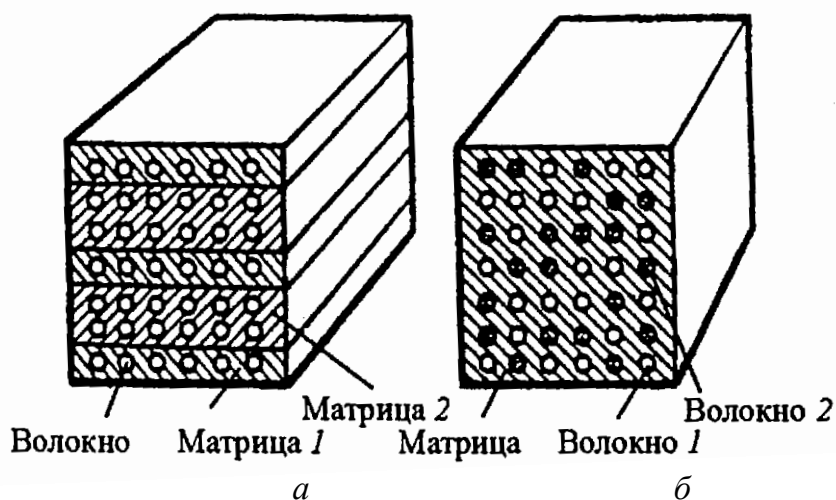


Рисунок 1.9 – Схемы полиматричного (*a*) и полиармированного (*б*) композиционных материалов

Наполнителями в дисперсно-упрочненных композитах служат дисперсные частицы тугоплавких фаз – оксидов, нитридов, боридов, карбидов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , BN, SiC и др.). В дисперсно-упрочненных композиционных материалах основную нагрузку воспринимает матрица, а дисперсные час-

тицы оказывают сопротивление движению дислокаций при нагружении материала, препятствуют развитию пластической деформации. Кроме того, дисперсные частицы оказывают «косвенное» упрочняющее действие, способствующее образованию структуры с большой степенью неравноосности зерен (волокнуистой), которая формируется при сочетании пластической деформации и отжига. Мелкодисперсные частицы, искусственно вводимые в матрицу, имеют размер 0,01...50 мкм, их доля составляет 0,1...25 % от общего объема материала. Матрица выполняется из Al, Ni, Be, Mg, Co, Cr либо из сплавов этих металлов.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы выпускают в виде листов, фольги, труб, профилей и получают, как правило, технологией порошковой металлургии.

Существуют также другие способы получения, например, метод непосредственного введения наполнителей в жидкий металл или сплав перед разливкой. При этом для улучшения смачиваемости частиц жидким металлом и равномерного распределения их в матрице применяют ультразвуковую обработку жидкого расплава.

К дисперсно-упрочненным композиционным материалам на алюминиевой основе, нашедшим достаточно широкое промышленное применение, относится материал из спеченной алюминиевой пудры (САП), в качестве упрочнителя применяется оксид алюминия  $Al_2O_3$ . Получают САП путем последовательного брикетирования, спекания и прессования окисленной с поверхности алюминиевой пудры. Исходным материалом при получении пудры служит порошок, который получают распылением расплавленного алюминия А6. Порошок измельчают в шаровых мельницах в атмосфере азота с добавлением 2...3 % кислорода (для окисления вновь образованных поверхностей пудры) и 0,25...1,2 % стеариновой кислоты для облегчения скольжения и препятствия свариванию частиц пудры. В настоящее время освоена технология получения алюминиевой пудры четырех марок и соответствующих им марок САП: САП-1, САП-2, САП-3, САП-4.

САП хорошо деформируется в горячем состоянии, легко обрабатывается резанием и удовлетворительно сваривается. Из этого композиционного материала производят различные виды полуфабрикатов: листы, профили, штампованные заготовки, трубы, фольгу; изготавливают детали машин: поршневые штоки, лопатки компрессоров, лопасти вентиляторов и

турбин в химической и нефтяной промышленности, конденсаторы, обмотки трансформаторов в электротехнике.

Спеченные алюминиевые сплавы (САС) изготавливают в основном по той же технологии, что и САП, – из порошков, полученных распылением сплавов заданных составов (АМц, АМг2, АМг6, АД33, АВ, Д20, Д16, В95 и др.).

В волокнистых композиционных материалах армирующим компонентом является одномерный упрочнитель, оси которого направлены вдоль одного из направлений, см. рис. 1.7, б, что приводит к анизотропии свойств подобных материалов. В качестве упрочнителя применяются: проволока диаметром от десятых долей до нескольких миллиметров из стали и тугоплавких металлов – W, Mo, Be (наиболее экономичный и доступный армирующий компонент); волокна диаметром 1...50 мкм из чистых неметаллических материалов (C, B) либо неметаллических тугоплавких соединений ( $Al_2O_3$ , SiC,  $ThO_2$ ), стекла; нитевидные кристаллы – отличающиеся совершенством структуры и имеющие близкие к теоретическим значения прочностных свойств монокристаллы диаметром от нескольких нанометров до нескольких сотен микрометров и длиной до нескольких сантиметров на основе карбидов и нитридов кремния, оксидов и нитридов алюминия, других соединений.

Матрица волокнистых композиционных материалов может быть металлической (алюминиевой, магниевой, титановой, никелевой), полимерной, керамической.

Именно в волокнистых композиционных материалах достигнуты высокие значения удельной прочности ( $\sigma_v/\rho$ , км) – до 45 (алюминиевая матрица, упрочненная борным волокном), до 55 (магниева матрица, упрочненная борным волокном), до 65...70 (углеволокниты), до 90...95 (стекловолокниты), что превышает значения удельной прочности даже для прочных сталей, см. табл.1.4.

Волокнистые композиционные материалы получают твердофазными, жидкофазными, газопарофазными, химическими и электрохимическими процессами.

Твердофазный метод совмещения компонентов композиции предполагает использование материала матрицы в виде листов, фольги, проволоки или порошка. Композиционный материал получают одним из следующих приемов: диффузионной сваркой под давлением, сваркой взрывом,

деформационной обработкой под давлением (прокаткой, волочением, роликовой или вальцовочной формовкой), прессованием с последующим спеканием (порошковой металлургией); магнитно-импульсным, гидроимпульсным, электроимпульсным компактированием и др.

Жидкофазные процессы получения волокнистых композиционных материалов заключаются в пропитке упрочняющих волокон или нитевидных кристаллов, расположенных в определенной последовательности или беспорядочно, расплавом материала матрицы. Пропитка волокон расплавом может реализоваться при нормальном давлении, в условиях вакуума (вакуумное всасывание), под давлением, в сочетании элементов вакуумной пропитки и литья под давлением.

К жидкофазным процессам получения волокнистых композиционных материалов следует также отнести метод получения композиции направленной кристаллизацией из расплавов эвтектического состава (метод будет рассмотрен в п. 2.5.1).

Газопарофазными способами наносят на армирующие волокна барьерные или технологические покрытия, обеспечивающие защиту от разрушения при взаимодействии с материалом матрицы. Их фазовый состав (чаще всего нитриды, бориды, оксиды, карбиды) выбирают, исходя из физико-химической и термомеханической совместимости армирующих волокон и материала матрицы.

Покрывают либо в результате разложения летучих карбонильных соединений металлов, либо испарения металлов и сплавов при термическом воздействии электронным лучом, ионными пучками, электрической дугой. Для прямого компактирования композиционных материалов используют более производительный метод газотермического плазменного напыления, обеспечивающий получение полуфабрикатов композиционных материалов. Плазменным методом наносят покрытия из матричного материала на армирующие волокна без существенного повышения их температуры.

Электролитические методы позволяют получать композиционные материалы в результате осаждения матричного материала на нитевидные кристаллы и волокна, которые непрерывно находятся в контакте с катодом. Процесс протекает при низкой температуре в отсутствие давления, что практически полностью исключает разрушение волокон и вредное влияние температурного фактора.

Химические методы позволяют осаждать металлические покрытия на непроводящие ток упрочнители в виде нитевидных кристаллов (сапфир), а также на углеродные волокна (ленты, пряжи). Металлическая пленка точно воспроизводит профиль волокна, и ее толщина легко контролируется параметрами технологического процесса. Сущность химического метода осаждения покрытий заключается в восстановлении ионов металлов на поверхности покрываемого вещества. Наиболее широко используют осаждение никеля, в меньшей степени меди, хрома, кобальта.

Для конструкционных композитов преобладающими являются твердофазные процессы получения, когда матрица находится в состоянии высокой пластичности и ограниченной реакционной способности.

Основными методами получения слоистых композитов являются прокатка, прессование, сварка взрывом, пайка.

Композиционные материалы применяют во многих отраслях промышленности. Основным потребителем данных материалов является авиация, где реализуются основные достоинства композиционных материалов – высокие удельные значения прочности и жесткости.

Композиционные материалы используются для изготовления несущих и вспомогательных конструкций самолетов, вертолетов, ракет. Так, композиты применяются для изготовления обшивки, панелей, корпусов самолетов и ракет, сопловых рабочих лопаток, крепежных деталей газотурбинных двигателей, секций крыльев, хвостового оперения и фюзеляжа самолетов, лопастей вертолетов и других многочисленных деталей.

Использование композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов уменьшило их массу на 30...40 %, увеличило полезную нагрузку без снижения скорости и дальности полета.

Композиционные материалы также используют в энергетическом машиностроении (рабочие и сопловые лопатки турбин), автомобилестроении (кузовы автомобилей и рефрижераторов, детали двигателей), химической промышленности (автоклавы, цистерны, емкости), судостроении (корпуса лодок, катеров, гребные винты), в горнодобывающей промышленности (буровой инструмент), металлургии (аноды для получения цветных металлов), архитектуре и строительстве, военной промышленности, чеканке монет.

Ресурсы композиционных материалов сегодня далеко не исчерпаны, и они являются по-прежнему весьма перспективным классом материалов.

## 1.7. Наноматериалы и нанотехнологии

Одним из бурно развивающихся научных направлений в области создания новых материалов сегодня является **нанотехнология**, в которой изучаются закономерности физико-химических процессов в пространственных областях нанометровых размеров с целью управления отдельными атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и эксплуатационными свойствами.

«Сырьем» в нанотехнологиях являются отдельные атомы, молекулы, молекулярные системы, а не привычные в традиционной технологии микронные или макроскопические объемы материала, содержащие миллиарды атомов и молекул. В отличие от традиционной технологии, для нанотехнологии характерен «индивидуальный» подход, при котором внешнее управление достигает отдельных атомов и молекул, что позволяет создавать из них как бездефектные материалы с принципиально новым уровнем свойств, так и новые классы устройств с характерными нанометровыми размерами.

При этом обозначение размеров не является самым главным в нанотехнологии. Принципиальным является квантовый характер нанообъектов и нанопроцессов и уникальная возможность целенаправленной сборки веществ на атомно-молекулярном уровне.

Еще в 1959 г. американский физик Ричард Фейнман, лауреат Нобелевской премии, высказал предположение о том, что в скором времени многие материалы и устройства будут изготавливать на атомарном или молекулярном уровне, и что это поможет получать материалы с невиданными доселе свойствами. Однако лишь четверть века спустя, в 80-х годах, появилась измерительная и рабочая аппаратура, необходимая для обращения с наноразмерными объектами. С этого момента и можно говорить о нанонауке как самостоятельной дисциплине.

По мнению ученых, нанотехнология – путь к новой, невиданной по своему размаху научно-технической революции, которая изменит облик мира в XXI веке, подобно тому, как открытие атомной энергии, изобретение лазера и транзистора определили облик XX столетия.

В наноисследованиях уже сегодня задействованы более 50-ти стран мира, выбрав свои ниши и вкладывая в нанотехнологии большие средства.



Объемы капиталовложений в развитие нанотехнологий в промышленно развитых странах ежегодно удваиваются, в ряде стран и регионов (США, Япония, Китай, Европейский союз) создаются приоритетные целевые программы.

Объем финансирования наноисследований и разработок в мире в 2003 г. составил 7,5 млрд. долл., в 2005 г. – 12 млрд. долл. Ожидается, что к 2015 г. мировой рынок наноматериалов и нанотехнологий превысит 1 триллион долл., а к 2030 г. около 50 % ВВП будет получено с помощью наноматериалов и нанотехнологий. Быстрый рост вложений в нанотехнологии за последние годы обусловлен осознанием фактического прогресса в этой области исследований и разработок.

К **наноматериалам**, являющимся уникальными материалами XXI века, относятся материалы, частицы или слои которых измеряются несколькими нанометрами или десятками нанометров.

По геометрическим размерам наноматериалы можно условно разделить на **нульмерные** – индивидуальные наночастицы (атомные кластеры, фуллерены), порошковые материалы; **одномерные** – нанотрубки; **двумерные** – нанопленки и мультислой, покрытия и ламинарные структуры; **трехмерные** – объемные компактные материалы с размером зерен нанометрового диапазона.

К наноматериалам также относятся проволоки и нити при их диаметре порядка нескольких или десятков нанометров; композиционные материалы, содержащие наполнитель из нанопроволок, наночастиц, нанопластин.

Наноматериалы привлекательны тем, что благодаря особенностям строения они проявляют ряд уникальных физических, химических, механических, биологических свойств, которые позволяют широко их использовать в современных отраслях высоких технологий.

Перечислить все области, в которых наноматериалы и нанотехнологии могут существенно ускорить технический прогресс, не представляется возможным. Ниже – только их краткий перечень:

- наноэлектроника и нанофотоника;
- компьютерная техника;
- телекоммуникационные и информационные технологии;
- нано – и микроэлектромеханика;
- новые виды конструкционных и инструментальных материалов;
- нанохимия и катализ, в том числе управление горением;

- топливные элементы и устройства хранения энергии;
- строительство;
- авиация, космические и оборонные приложения;
- устройства контроля окружающей среды;
- фармакология и медицина, в том числе диагностика и создание искусственных мускулов, костей, органов;
- биомеханика, геномика, биоинформатика;
- сельское хозяйство и производство пищевых продуктов и др.

Одним из важнейших перспективных направлений использования компактных наноматериалов является *создание на их основе принципиально нового класса **конструкционных материалов***.

Если рассмотреть наиболее весомые для конструкционного материала механические свойства наноматериалов, то они действительно уникальны. Так, твердость наноматериалов в 3...7 раз выше твердости крупнозернистых аналогов, предел текучести ( $\sigma_T$ ) – в 2...3 раза, а предел прочности на растяжение ( $\sigma_B$ ) в 1,5...8 раз выше, чем у соответствующих аналогов.

Прочность, важнейшее свойство конструкционных материалов, как известно, определяется химическим составом и реальной атомарной структурой, т.е. наличием определенной кристаллической решетки – или ее отсутствием – и всем спектром ее несовершенств.

Высоких прочностных показателей можно добиться двумя прямо противоположными способами: снижая концентрацию дефектов структуры (в пределе приближаясь к идеальному монокристаллическому состоянию) или, наоборот, увеличивая ее вплоть до создания мелкодисперсного нанокристаллического или аморфного состояния, рис.1.10. Оба пути широко используют в современном физическом материаловедении и в производстве. В обоих направлениях может быть достигнут значительный прогресс именно благодаря наноматериалам, см. рис. 1.10.

Наноматериалы превосходят традиционные аналоги также по ударной вязкости, износостойкости, коррозионной стойкости, что весьма важно при определении вопроса о промышленном применении их в качестве конструкционных материалов.

Выбор материала для его применения в конструкциях обычно определяется соотношением между прочностью и пластичностью; наилучшим таким соотношением обладают, как известно, металлические материалы, прежде всего, стали.



Рисунок 1.10 – Схематическая зависимость предела прочности на растяжение от плотности атомарных дефектов в материале ( $G$  – модуль сдвига)

Использование современных конструкционных материалов обычно ограничивается тем, что увеличение прочности ведет к снижению пластичности. Данные по наноматериалам и более глубокое изучение физики деформационных процессов, которые определяют пластичность наноструктурных материалов, показывают, что уменьшение структурных элементов может привести к созданию принципиально новых типов конструкционных материалов, сочетающих высокие прочность и пластичность, рис. 1.11.

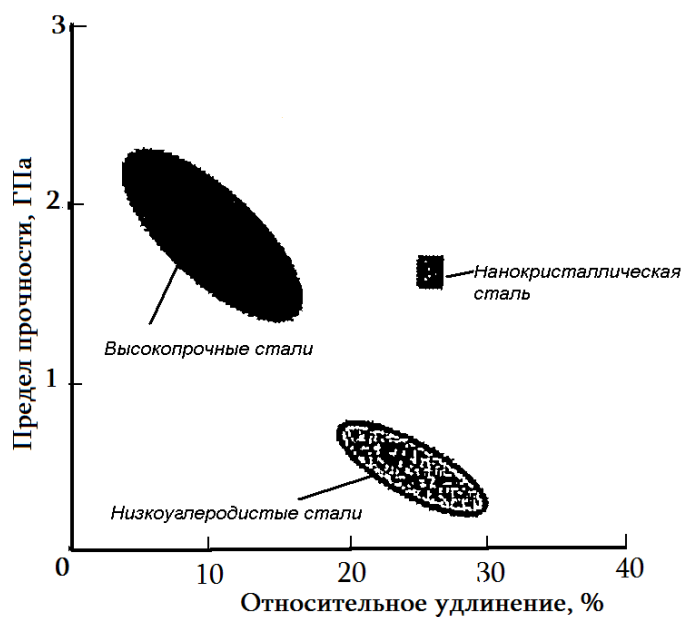


Рисунок 1.11 – Соотношение между прочностью и пластичностью для сталей

Даже такие хрупкие материалы, как интерметаллиды, становятся пластичными при уменьшении размеров зерен ниже критических размеров, что можно объяснить наличием специфических механизмов зарождения и распространения микротрещин.

В частности, предполагается, что пластичность наноматериалов обеспечивается недислокационным механизмом, так как благодаря малому размеру зерен вероятность появления подвижных дислокаций в зерне чрезвычайно мала. Данные исследований свидетельствуют о том, что в наноструктурных материалах «включается» особый механизм деформации в виде зернограницного некристаллографического скольжения, уже при низ-

ких температурах конкурирующий с действием стандартного кристаллографического внутризеренного дислокационного скольжения и двойникования.

О возможности реализации недислокационных механизмов пластичности свидетельствует также свойство наноматериалов проявлять сверхпластичность при достижении степеней деформации 1000 % и более. Как известно, для реализации эффекта структурной сверхпластичности одним из необходимых условий является наличие мелкозернистой структуры, а основным механизмом сверхпластичности является зернограницное скольжение.

Более того, многие наноструктурные материалы проявляют высокотемпературную сверхпластичность в результате зернограницного проскальзывания при более высоких скоростях деформации и меньших температурах, чем обычные поликристаллические сплавы тех же составов в режиме сверхпластичности.

Установлена «аномалия» не только механических, но и электрических, магнитных, оптических свойств наноматериалов по сравнению с традиционными аналогами.

### **1.7.1. Структурная зависимость свойств нанокристаллических материалов**

Существенные изменения свойств наноматериалов по сравнению с традиционными металлами и сплавами связаны, в первую очередь, с особенностями их структурного состояния.

Так, при переходе от массивного к наносостоянию *происходит изменение соотношения поверхностных и объемных атомов материала.*

Поверхность даже самого идеального кристалла может считаться большим двумерным или даже объемным дефектом и служит стоком (почти бесконечной емкости) для большинства дефектов кристаллического строения благодаря действию сил изображения и других причин.

Силы изображения получили свое название по методу расчета электрических полей, который заключается в мысленном помещении симметрично за границей раздела точно такого же объекта, но противоположно заряженного. Силы изображения убывают по мере удаления от поверхности, но если размер частицы достаточно мал, они могут «высосать» из объема на поверхность большинство дефектов и сделать его более совершенным в структурном и химическом отношении.

Общеизвестно, что поверхностные атомы обладают свойствами, отличными от объемных, поскольку они связаны с соседями по-иному, нежели в объеме. В результате на поверхности может произойти атомная реконструкция и возникнет другой порядок расположения атомов. Поверхностные атомы в общем случае находятся на более близких расстояниях друг от друга, чем атомы в объеме кристаллической решетки, и обладают повышенным запасом энергии. Атомные связи поверхностных атомов оказываются частично нескомпенсированными.

Все это вместе взятое существенным образом изменяет механические, электрические, оптические и другие свойства вещества и позволяет рассматривать приповерхностный слой как некое новое состояние вещества.

До определенного размера частиц доля поверхностных атомов мала, их вкладом можно пренебречь. У наночастиц свойства поверхностных атомов становятся определяющими. По мере того, как размер зерен или частиц  $R$  становится все меньше и меньше, все большая доля атомов  $a$  оказывается на свободных поверхностях ( $a \sim S/V \sim R^2/R^3 \sim 1/R$ ;  $S$  – поверхность частицы,  $V$  – ее объем).

Считая, что зерна имеют сферическую форму, и полагая толщину слоя 1 нм (что соответствует 2...3 атомным слоям для большинства металлов), получаем следующие соотношения между диаметром зерна и объемной долей поверхностного слоя:

Диаметр зерна (частицы), нм.....	100	50	25	20	10	6	4
Объемная доля поверхностного слоя, %.....	6	12	24	30	60	100	150

Таким образом, в нанокристаллических материалах, начиная с диаметра зерна 6 нм, объем поверхностного слоя становится больше объема кристаллов. С этих позиций наночастицами предложено считать образования, содержащие не более 1000 атомов и имеющие размер не более 10 нм. Чаще за максимальный принимают размер 100 нм.

«Аномалии» свойств наноматериалов, прежде всего, объемных (компактных), обусловлены также тем, что при уменьшении размера зерна *увеличивается протяженность межзеренных границ* и их вклад в механизмы прочности и пластичности материала.

Границы зерен действуют как барьеры для распространения дислокационных сдвигов.

Созданы особые структурные модели зерен и их границ в наноструктурных материалах. Главным в них является представление о неравновесных границах зерен с предельно высокой плотностью практически всех видов дефектов (вакансий, примесных атомов, дислокаций и т.д.), высокой избыточной энергией и далекодействующими упругими напряжениями.

В структуре наноматериалов, таким образом, выделяют относительно слабо искаженные центральные части зерен («внутризеренную фазу») и сильно искаженные зоны вдоль границ зерен шириной несколько нанометров («зернограничную фазу»). Количественное соотношение данных зон становится немалым при нанометровом масштабе зерен (менее 100 нм).

Так, с уменьшением размера зерна от 20 нм до 2 нм объемная доля межзеренного вещества (границ зерен и тройных стыков) увеличивается до 80 %, рис. 1.12. Объемные доли межзеренной (дефектной) и внутризеренной (совершенной) компоненты равны при размере зерна около 5 нм.

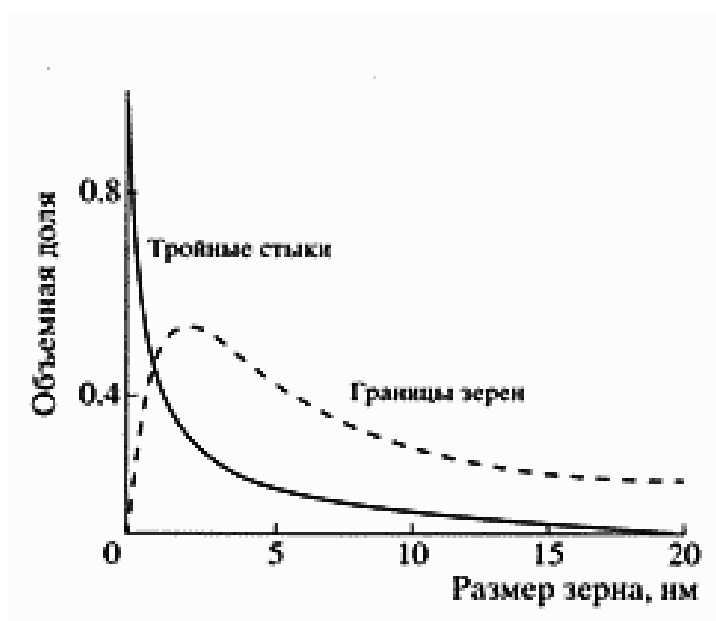


Рисунок 1.12 – Зависимость объемной доли границ зерен и тройных стыков от размера зерна

Еще одно обстоятельство, объясняющее «аномальные» физико-механические свойства наноматериалов, связано с *совпадением размеров кристаллитов с характерными размерами для различных явлений и свойств* – механических, электрических, магнитных, химических.

Так, при рассмотрении любого процесса переноса (протекания электрического тока, теплопроводности, пластической деформации и т.п.) носителям приписывают некоторую эффективную длину свободного пробега  $R_f$ . Если размер частицы вещества  $R \gg R_f$ , рассеяние (или захват и гибель) носителей происходит в объеме и слабо зависит от геометрии объекта. При  $R < R_f$  ситуация радикально меняется и все характеристики переноса начинают сильно зависеть от размеров образца.

В связи с этим особый научный интерес к наноструктурным материалам связан, прежде всего, с ожиданием различных размерных эффектов на свойствах наночастиц или наноструктур, размеры которых соизмеримы или меньше, чем характерный корреляционный масштаб того или иного физического явления или характерная длина, фигурирующая в теоретическом описании какого-либо свойства или процесса.

В размерном масштабе 1...100 нм *наночастицы находятся на границе квантового и классического микромиров*, и это метастабильное состояние также во многом определяет исключительный комплекс физико-химических свойств.

Дело в том, что многие физические явления в наномасштабах обусловлены волновой природой частиц, например, электронов, поведение которых подчиняется законам квантовой механики.

Если объект имеет атомарный масштаб в одном, двух или трех направлениях, его свойства могут резко отличаться от объемных для того же материала из-за проявления в поведении квантовых закономерностей. Например, когда хотя бы один из размеров объекта становится соизмеримым с длиной волны де Бройля для электронов  $\lambda_B$  (т.е. волны, отражающей квантовую природу микрочастиц), вдоль этого направления начинается размерное квантование. Для металлов  $\lambda_B = 0,1 \dots 1$  нм, для полупроводников  $\lambda_B \sim 100$  нм.

*Таким образом, уникальные свойства наноматериалов определяются размерным фактором и существенным вкладом поверхности, увеличением общей доли границ раздела (межзеренного вещества); коллективным поведением и взаимодействием между отдельными зернами; соизмеримостью размера наночастиц с характерными для различных физических процессов размерами и проявлением квантовых эффектов.*

### 1.7.2. Методы получения наноматериалов

Весьма важной проблемой в широком использовании наноматериалов является разработка недорогих методов изготовления наноструктур в больших количествах, так как нанонаука сможет добиться реальных успехов лишь тогда, когда предложит экономически выгодные технологии.

Рассмотрим основные методы получения наноматериалов.

***В компактном (объемном) виде*** нанокристаллические материалы получают:

♦ *переработкой частиц размером менее 100 мкм методами порошковой металлургии* в компактный материал прессованием и спеканием, в том числе под давлением. Методом компактирования ультрадисперсных порошков получают наноматериалы, в основном, металлы, оксиды, керамику, с относительной плотностью 70...90 % и размером зерна 100...500 нм;

♦ *сверхбыстрой закалкой расплава*. Расплавы, подвергнутые быстрой закалке (скорости охлаждения достигают  $10^7 \dots 10^8$  К/с), затвердевают с большой скоростью. В результате возникает большое число центров кристаллизации, при этом скорость их роста является низкой, что приводит к



формированию нанокристаллической зеренной структуры. Этим методом удается получать наноструктуры с размером зерна менее 1 нм;

♦ *интенсивной пластической деформацией металлических сплавов.* Для обеспечения необходимых степеней деформации используют различные методы: равноканальное угловое прессование, деформацию кручением, всестороннюю ковку, прокатку и др., сущность которых будет рассмотрена далее в п. 3.3. Подобные процессы позволяют получать массивные образцы материала с практически беспористой структурой, что недостижимо в других методах. Данная технология применяется для получения наноструктур меди, железа, никеля, сплавов на основе алюминия, магния, титана.

**Нанопорошки** различных металлов, карбидов, нитридов, оксидов и других керамических материалов получают механическими, физико-химическими методами. Данные технологии во многом аналогичны традиционно применяемым в технологии порошковой металлургии, но имеют определенные особенности, связанные со спецификой наноразмерных объектов.

Выбор метода получения нанопорошков определяется областью их применения, желательным набором свойств конечного продукта. Характеристики порошковой массы – гранулометрический состав, форма частиц, содержание примесей, величина удельной поверхности – могут колебаться в зависимости от способа получения в весьма широких пределах. Например, в зависимости от условий получения нанопорошки могут иметь сферическую, гексагональную, хлопьевидную, игольчатую форму, аморфную или мелкокристаллическую структуру.

*Механические методы* получения порошков, как известно, состоят в механическом измельчении исходного сырья и характеризуются переработкой исходного материала практически без изменения химического состава.

Измельчение при получении нанопорошков осуществляется в мельницах различного типа – шаровых, планетарных, центробежных, вибрационных, гироскопических устройствах, атриторах и симолойерах (высокоэнергетичных, с большой емкостью, измельчительных аппаратах с неподвижным корпусом – барабаном с мешалками, передающими движение шарам в барабане; измельчение, в отличие от других типов измельчающих

устройств происходит главным образом не за счет удара, а по механизму истирания).

Механическим путем получают нанопорошки металлов, керамики, полимеров. Степень измельчения зависит от вида материала и выбранного метода.

Положительной стороной механических способов измельчения является сравнительная простота установок и технологии, возможность измельчать различные материалы и получать порошки сплавов, а также возможность получать материал в большом количестве.

К недостаткам метода относятся возможность загрязнения измельчаемого порошка истирающими материалами, а также трудность получения порошков с узким распределением частиц по размерам, сложность регулирования состава продукта в процессе измельчения.

К *физико-химическим методам* получения порошков относят такие технологические процессы, в которых получение порошка связано с изменением состава исходного сырья или его состояния в результате химического или физического воздействия на исходный продукт. Физико-химические методы синтеза условно делят на химические и физические.

*Химические методы* основаны на использовании тех или иных фазовых превращений, происходящих в жидкости или паре. Эти методы включают процессы осаждения, термического разложения или пиролиза, газо-фазных химических реакций, восстановления, гидролиза, электроосаждения.

Как правило, методы данной группы – многостадийные и включают некий набор из вышеуказанных процессов и реакций.

*Физические методы* получения нанопорошков металлов основаны на испарении металлов, сплавов или оксидов с последующей их конденсацией в реакторе с контролируемой температурой и атмосферой.

Фазовые переходы пар-жидкость-твердое тело или пар-твердое тело происходят в объеме реактора или на поверхности охлаждаемой подложки или стенок.

Сущность методов состоит в том, что исходное вещество испаряется путем интенсивного нагрева, с помощью газа-носителя подается в реакционное пространство, где резко охлаждается. Нагрев испаряемого вещества осуществляется с помощью плазмы, лазера, электрической дуги, печей сопротивления, индукционным способом, пропусканием электрического тока.

Обязательным условием во всех случаях является сверхбыстрое охлаждение, с перепадом температур до  $10^5 \dots 10^7$  градусов в секунду. В результате материал быстро охлаждается, и его кристаллизация происходит в виде наночастиц.

В зависимости от вида исходных материалов и получаемого продукта испарение и конденсацию проводят в вакууме, в инертном газе, в потоке газа или плазмы. Размер и форма частиц зависят от температуры процесса, состава атмосферы и давления в реакционном пространстве. Таким методом получают порошки Ni, Mo, Fe, Ti, Al, сложных химических соединений. Размер частиц при этом – десятки нанометров.

Эффективным и достаточно распространенным методом данной группы является *метод электрического взрыва проволок (ЭВП)*, заключающийся в том, что через отрезок металлической проволоки (фольги) диаметром 0,1...1,0 мм пропускается импульс тока большой силы ( $10^4 \dots 10^6$  А/мм<sup>2</sup>), под действием которого проволока разрушается на мельчайшие частички и пар. Разлетаясь с большой скоростью, продукты разрушения быстро охлаждаются, и образуется высокодисперсный порошок.

***Наноматериалы в виде покрытий*** получают осаждением ультрадисперсных частиц на холодную или подогретую поверхность подложки.

Реализуются традиционные пленочные технологии химического осаждения из газовой фазы (CVD), физического осаждения (PVD), а также методы электроосаждения, золь-гель технологии.

Получают пленки металлов, карбидов, нитридов, боридов (например, TiN, TiB<sub>2</sub> и др.) с размером кристаллитов от 1 до 30 нм.

Весьма перспективные благодаря своим свойствам многослойные наноструктурные материалы (МСМ) с толщиной отдельных слоев нанометрового диапазона получают методом вакуумного напыления, термомеханическим способом, порошковой металлургией, литьем.

Вакуумное напыление позволяет получать слоистые композиции с толщиной слоя 20...30 нм и более. Однако сложность и дороговизна вакуумной техники, а также низкая производительность метода пока не позволяют широко использовать указанный способ при изготовлении, например, тонкого листа для применения в машиностроении.

Более перспективным в этом плане является термомеханический спо-

способ получения МСМ. Способ заключается в деформации (прессовании) и спекании в вакууме пакета фольг из стали, никеля, меди или серебра с последующей прокаткой и отжигом. В итоге получают фольгу общей толщиной 0,1...1 мм с общим количеством слоев до  $10^4$ , толщиной отдельных слоев 100...10 нм. В общей сложности технология получения МСМ составляет 12...14 термообработок и столько же обработок давлением.

Термомеханический способ является достаточно производительным и обеспечивает получение промышленно применимой продукции, однако имеет существенный недостаток – многостадийность, трудоемкость, большие степени деформации и соответственно высокий износ оборудования.

Более простым и менее трудоемким способом является получение МСМ с использованием технологий порошковой металлургии и литья.

Кроме технологий создания наноматериалов методами ультраминиатюризации путем создания более мелких структур из крупных элементов конкретных фаз, наноматериалы можно создавать путем сборки в атомно-молекулярном масштабе, в идеале – с использованием явления самоорганизации (самосборки).

**Управляемый механосинтез**, т.е. составление молекул из атомов с помощью механического приближения до тех пор, пока не вступят в действие соответствующие химические связи, является одной из основных проблем в наноиндустрии и одним из важнейших направлений нанотехнологий.

Идеи управления строением вещества на атомарном уровне были высказаны Р.Фейнманом еще в середине XX века: «Если вместо того, чтобы выстраивать атомы по ранжиру, строй за строем, колонну за колонной,... если вместо этого располагать их каждый раз по-новому, разнообразя их мозаику, не повторяя того, что уже было, – представляете, сколько необыкновенного, неожиданного может возникнуть в их поведении...».

Уникальное решение проблемы манипулирования индивидуальными атомами и молекулами для производства продуктов с заданной атомарной структурой предложил американский футуролог Эрик Дрекслер (1989 г.) в книге «Машины созидания».

Согласно его идее, для осуществления механосинтеза необходим наноманипулятор, способный захватывать отдельные атомы и молекулы и манипулировать ими в радиусе до 100 нм. Наноманипулятор должен

управляться либо макрокомпьютером, либо нанокompьютером, встроенным в робота-сборщика (ассемблера). Определение Дрекслера: «ассемблер – это молекулярная машина, способная к саморепликации (репликация – от лат. *replicatio* – повторение, размножение), которая может быть запрограммирована строить практически любую молекулярную структуру или устройство из более простых химических строительных блоков».

Наномашины должны уметь захватывать атомы или молекулы и соединять их между собой не хаотично, а в соответствии с заданным алгоритмом, т.е. главная задача ассемблера – соединение атомов и молекул в заданном порядке.

Кстати, такие машины уже тысячи лет превосходно функционируют в природе, и примером их работы может служить механизм синтеза белка рибосомами. Генные инженеры сегодня пытаются построить первые экспериментальные искусственные наномашины, используя природный биологический материал – аминокислоты, белки, молекулы ДНК и др. Однако биоподобные наномашины – это органика, а значит, их возможности ограничены.

Поэтому, несмотря на гениальную идею, сегодня промышленных наномашин-ассемблеров, способных создавать реальные функциональные материалы, пока не существует.

Одним из вполне реальных инструментов для создания наноструктур из отдельных атомов являются зондовые микроскопы.

В общем случае объекты – отдельные атомы или отдельные молекулы – можно двигать по поверхности, толкая или поднимая с поверхности на сканирующий зонд и устанавливая на другое место. В данном случае сканирующий щуп действует как своеобразный экскаватор наномира и с помощью определенных движений острием микроскопа удается создавать атомные структуры.

Кстати, надпись «IBM» из отдельных атомов ксенона, выполненная подобным методом на грани (110) монокристалла никеля, рис.1.13, а, была первой практической демонстрацией возможности атомной сборки материала. Другие примеры атомной сборки приведены на рис. 1.13, б, в, г, д.

Сборка поверхности путем перемещения отдельных атомов или молекул с помощью сканирующего зонда весьма «элегантна» и демонстративна, применима при научных исследованиях, однако слишком дорога и дли-

тельна для промышленного применения для построения массивного материала по атому.

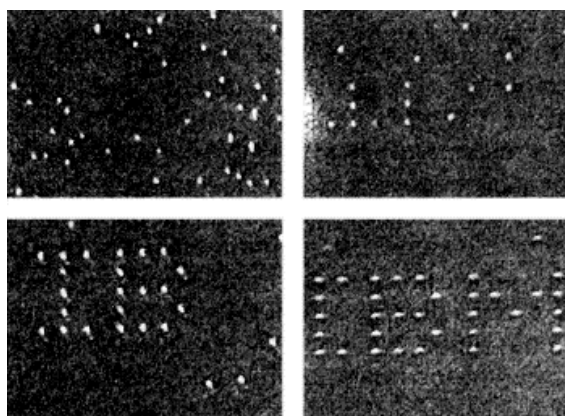
Даже при сборке с нереально высокими скоростями  $10^6$  атомов в секунду потребуется  $\sim 10^{17}$  с для построения горсти полезного материала.

Поэтому более перспективным и реальным является метод построения наноструктур с помощью отдельных компоновочных блоков или молекул – процесса самосборки.

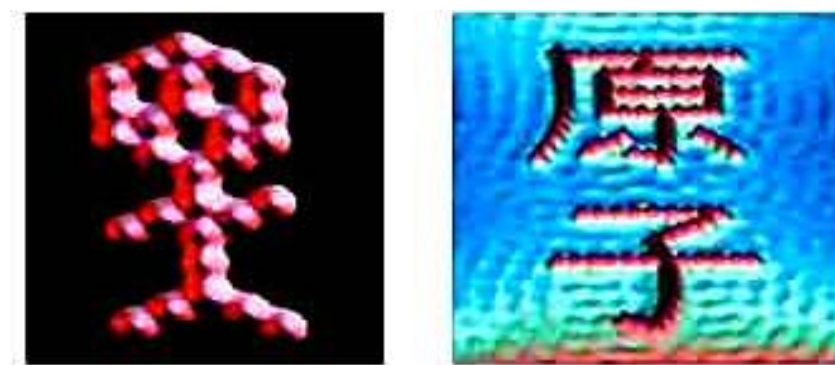
Под **самосборкой** понимают способность атомов и молекул при определенных условиях самопроизвольно соединяться в наперед заданные молекулярные образования.

Самосборка широко распространена в живой природе. Структура всех тканей определяется их самосборкой из клеток, структура самих клеток определяется самосборкой из отдельных молекул и т.д.

Механизм самосборки наносистем в природе подтолкнул исследователей к попытке скопировать его принципы для построения искусственных наноструктур.



*a*



*б*

*в*

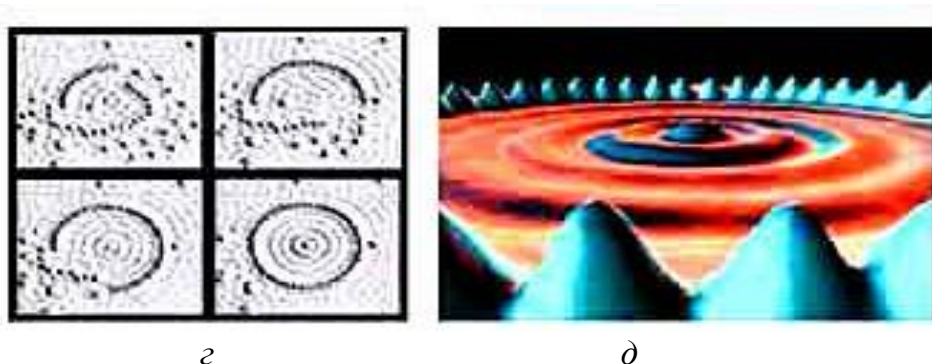


Рисунок 1.13 – Примеры атомной сборки материалов, выполненной с помощью сканирующего туннельного микроскопа:

*a* – последовательность реализации надписи «*IBM*» из отдельных атомов ксенона на грани (110) монокристалла никеля; *б* – «пляшущий человечек», выложенный молекулами монооксида углерода; *в* – иероглифы, выложенные атомами железа на поверхности меди; *г* – поатомная сборка «квантового загона» для электронов из 48-ми атомов железа на поверхности кремния; *д* – стоячие волны электронной плотности захваченного «загоном» электрона

Строительными элементами при самосборке являются не отдельные атомы («нанокирпичики»), а большие компоновочные блоки или молекулы (подобно конструктору «*Lego*»). Это весьма важный момент, т.к. построение вещества на уровне атомной сборки весьма неэффективно и требует достаточно длительного времени.

Большим преимуществом такой самосборки является возможность подготовки больших структур без необходимости встраивать отдельно конкретные наноструктуры, что приходится делать при построении нано-объектов с помощью атомного микроскопа.

Принцип самосборки состоит в том, что молекулы всегда стремятся перейти на самый нижний из доступных для них уровней энергии. Если этого можно добиться, соединившись с другими молекулами, молекулы соединятся. Если поможет переориентация их физических положений, молекулы переориентируются.

При самосборке наноконструктор вводит определенные атомы или молекулы на поверхность или на ранее собранную наноструктуру. Затем молекулы выравнивают себя в определенных положениях, иногда формируя слабые связи, например, водородные или Ван-дер-Ваальсовы, а иногда – сильные ковалентные связи, минимизируя общую энергию.

Наносборка представляет интерес не только для теоретических исследований. Полученные наносборкой объекты имеют весьма широкие перспективы для различных промышленных применений.

Например, один из типов самосборки, называемый *гетероэпитаксией*, касается образования полупроводниковых островков и пленок. Гетероэпитаксия широко используется при промышленном изготовлении многих полупроводниковых устройств.

Другое применение самосборки – *самособранные монослои (самоорганизующиеся слои, self-assembled monolayers, SAM's)*, используемые в качестве оптических покрытий, биосенсоров, пассиваторов, защищающих основную поверхность от коррозии.

Разработан метод самосборки наноблоков с превращением их в линии, квадраты, цилиндры и другие необычные структуры (США, Мичиганский университет). В методе используются так называемые «липкие заплатки», которые «лепят» группу частиц в указанную программой форму. Метод напоминает размножение клетки по заданной программе и предназначен для изготовления новых материалов и устройств.

Американским ученым (Колумбийский университет, Новорлеанский университет, компания *IBM*) на принципе самосборки удалось собрать из наночастиц двух различных веществ материал с заданной трехмерной структурой, рис. 1.14.

Разработанная новая технология позволит использовать для "модульной сборки" нанокомпозитов наночастицы из самых разных веществ и материалов. Главный наблюдатель и эксперт по нанотехнологиям Национального научного фонда США М. Роко не без оснований утверждает, что работа американских ученых может привести к очередной промышленной революции.



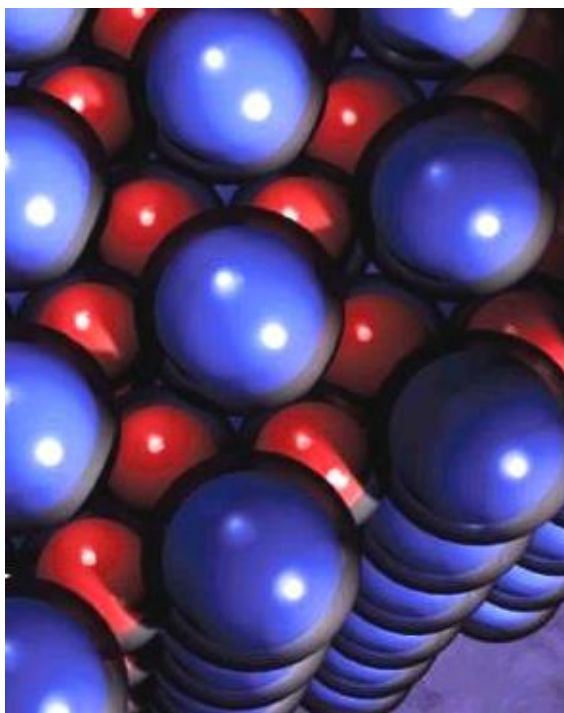


Рисунок 1.14 – Структура, формируемая в результате самосборки наноматериалов

Самосборка является основой принципиально новой перспективной технологии будущего – *молекулярной электроники* – направлением, имеющим целью создание электронных устройств на основе отдельных молекул, прежде всего, компьютеров.

### 1.7.3. Углеродные наноматериалы

Проявление истинно наноразмерных эффектов реализуется в углеродных наноматериалах – фуллеренах, нанотрубках, графенах.

Одним из представителей углеродных наноматериалов являются *фуллерены* – разновидность новой аллотропической (полиморфной) формы углерода.

Фуллерены как новая форма существования углерода в природе, наряду с давно известными алмазом и графитом (и не всеми учеными признанным карбином), были обнаружены сначала в космосе (астрофизиками при изучении межзвездной пыли), а затем получены в 1985 г. при исследовании масс-спектров паров графита после лазерного облучения твердого образца. Первооткрывателями новой формы существования углерода в природе являются Г. Крото (Англия), Р.Керл и Р.Смолли (США), удостоенные Нобелевской премии за 1996 г.

Особенностью строения фуллеренов является наличие высокосимметричной молекулы (по-видимому, наиболее симметричной из известных к настоящему времени в трехмерном мире, наиболее близкой к сферической форме) –  $C_{60}$ . Такая молекула состоит из 60-ти атомов углерода, расположенных на сфере диаметром  $\sim 1$  нм и напоминает футбольный мяч, рис. 1.15.

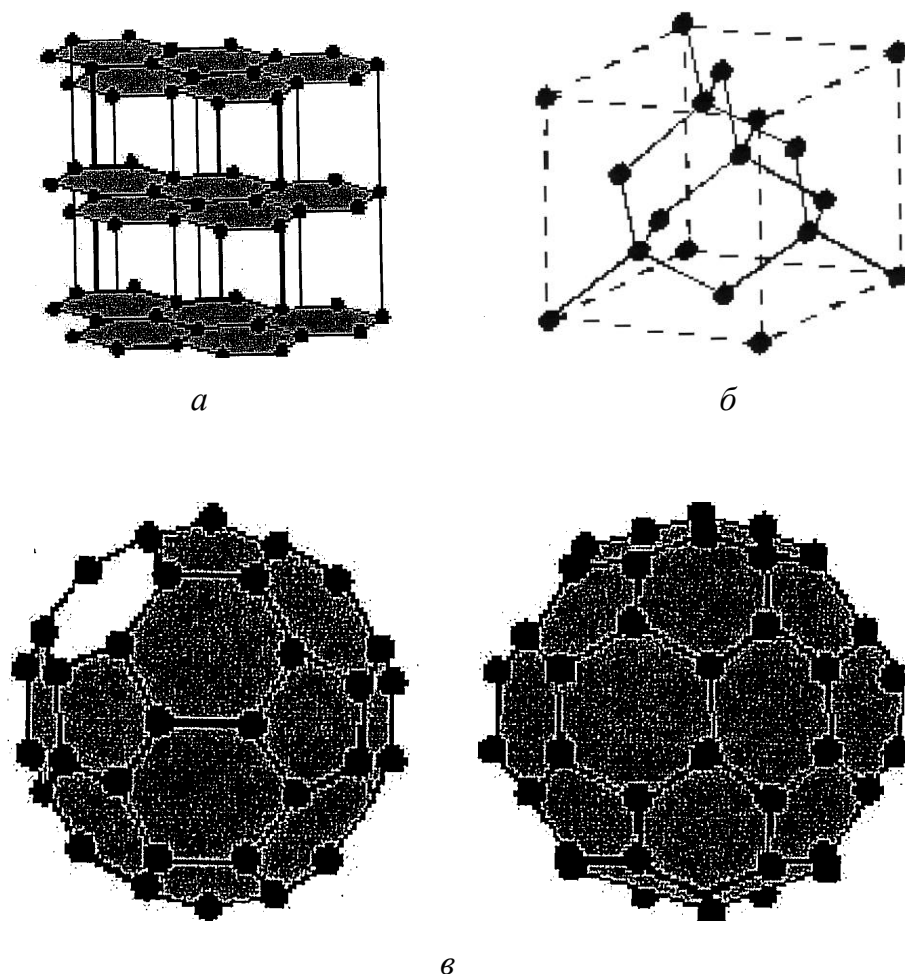


Рисунок 1.15 – Структура аллотропических модификаций углерода:  
*a* – графит; *б* – алмаз; *в* – фуллерен

К устойчивым молекулам также относятся  $C_{70}$ ,  $C_{84}$ . Фуллерены с числом атомов  $n > 70$  получили название гиперфуллеренов (высших фуллеренов). По мере исследования фуллеренов были синтезированы и изучены также молекулы, содержащие различное четное число атомов углерода – от 20 до 960.

Атомы углерода в молекуле  $C_{60}$  образуют 12 правильных пятиугольников (пентагонов) и 20 правильных шестиугольников (гексагонов). При

этом каждый пятиугольник граничит только с шестиугольниками, а каждый шестиугольник имеет общие стороны с шестиугольниками и три – с пятиугольниками, см. рис. 1.15, в.

Каждый атом углерода в молекуле расположен в вершинах двух гексагонов и одного пентагона. Валентные атомы каждого атома находятся в  $sp^2$ -гибридизованных состояниях, сходных с состояниями электронов в графите.

Таким образом, фуллерены представляют собой полые внутри кластеры, замкнутая поверхность которых образована правильными многогранниками из атомов.

Новая форма углерода является новой по существу. В противоположность первым двум, графиту и алмазу, структура которых представляет периодическую решетку атомов, см. рис. 1.15, а, б, третья форма чистого углерода является молекулярной. Это означает, что минимальным элементом ее структуры является не атом, а молекула.

Кстати, название данных энергетически нейтральных частиц связано с фамилией американского архитектора-авангардиста Бакминстера Фуллера, применившего плоские строительные элементы в форме многоугольников при строительстве куполов зданий. Иногда фуллерены также называют «бакиболом» («баки» – от уменьшительного имени Б.Фуллера, «-бол» – от англ. *ball*- мяч).

Интересен такой исторический факт: форма фуллерена как одного из наиболее совершенных пространственных тел впервые, скорее всего, была нарисована Леонардо да Винчи для книги Луки Пачоли «Божественная пропорциональность», т.е. задолго до создания новейшей формы футбольного мяча (70-е годы XX века).

Молекулы фуллерена могут иметь не только сферическую форму. Возможно формирование эллипсов и многослойных сфер («луковичных» структур). Однако во всех случаях размер молекулы фуллерена составляет ~1 нм, в растворе частицы обладают свойствами броуновской частицы.

Шарообразные (или эллипсообразные) молекулы фуллерена имеют необычную симметрию и уникальные свойства. Например, завершенность элементарной структурной единицы по сравнению с бесконечными кластерами атомов в графите и алмазе обуславливает способность фуллеренов хорошо растворяться в органических растворителях. Это единственная растворимая аллотропическая форма углерода.

Установлено, что фуллерены могут являться основой для создания с другими элементами очень многих соединений с разнообразными свойствами. Одна из наиболее интересных и заманчивых проблем в этом направлении – внедрение внутрь молекулы  $C_{60}$  атомов различных элементов (интеркаляция). Такие фуллерены называются эндофуллеренами.

Например, внедрение атомов различных металлов может существенно изменить электрические свойства фуллеренов и даже превратить изолятор в проводник.

В настоящее время известно, что более трети элементов периодической таблицы Менделеева могут быть помещены внутрь молекулы.

С этой точки зрения весьма привлекательны атомы редкоземельных элементов, таких как тербий, гадолиний, диспрозий, обладающих ярко выраженными магнитными свойствами. Фуллерен, внутри которого расположен такой атом, должен обладать свойствами магнитного диполя, ориентацией которого можно управлять внешним магнитным полем.

При этом возникает перспектива использования фуллеренов в качестве основы для создания запоминающей среды со сверхвысокой плотностью информации.

Как известно, в настоящее время в качестве накопителей информации широко используются магнитные диски. При этом информационная среда представляет собой тонкую пленку ферромагнитного материала; поверхностная плотность записи информации  $\sim 10^7$  бит/см<sup>2</sup>. Оптические диски, действие которых основано на лазерной технологии, позволяют достичь информационной плотности  $\sim 10^8$  бит/см<sup>2</sup>. При использовании фуллереновых магнитных диполей, расположенных на поверхности жесткого диска на расстоянии 5 нм друг от друга, плотность записи информации достигнет фантастических значений – до  $10^{12}$  бит/см<sup>2</sup>. Это даст человеку невиданное информационное могущество, например, все книги, изданные в мире с момента появления книгопечатания, можно будет записать всего на одну дискету современного формата.

Весьма интересные результаты достигнуты в направлении синтеза полимеров на основе фуллеренов. При этом фуллерен  $C_{60}$  служит основой полимерной цепи, а связь между молекулами осуществляется с помощью бензольных колец. Такая структура получила название «нить жемчуга»;

так были синтезированы металлоорганические полимеры типа  $(C_{60}Pd)_n$ ,  $(C_{60}Pd_2)_n$  и др.

Все ковалентные связи в фуллеренах насыщены, и между собой они могут взаимодействовать только благодаря слабым Ван-дер-Ваальсовым силам. При этом последних хватает, чтобы построить из сферических молекул кристаллические структуры – **фуллериты** с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК).

Поскольку 60-атомная молекула имеет диаметр 0,71 нм, размеры элементарной ячейки фуллерита весьма внушительны: каждая сторона куба равна 1,42 нм, а расстояние между центрами ближайших атомов-соседей составляет около 1 нм. В ГЦК-кристаллах, состоящих из атомов, обычно сторона куба не превышает 0,4 нм, а расстояние между ближайшими соседями  $\sim 0,3$  нм.

На рис. 1.16 представлена элементарная ячейка кристалла фуллерита.

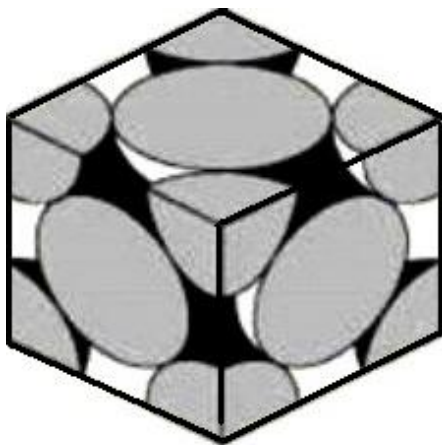


Рисунок 1.16 – Элементарная ячейка ГЦК-решетки фуллерита

При понижении температуры до 249 К фуллерит испытывает фазовое превращение 1-го рода, при котором ГЦК-решетка перестраивается в простую кубическую. При этом объем фуллерита увеличивается на 1 %.

Логично предположить, что вещество, состоящее из столь удивительных молекул, будет обладать и необычными свойствами.

Кристалл фуллерита имеет плотность  $1,7 \text{ г/см}^3$ , что значительно меньше плотности графита ( $2,3 \text{ г/см}^3$ ) и тем более алмаза ( $3,5 \text{ г/см}^3$ ), что обусловлено тем, что молекулы фуллеренов полые.

Фуллерит не отличается высокой химической активностью. Молекула  $C_{60}$  сохраняет стабильность в инертной среде аргона вплоть до  $T \sim 1200 \text{ К}$ ,

однако в присутствии кислорода уже при 500 К наблюдается значительное окисление с образованием CO и CO<sub>2</sub>; при этом фуллерены полностью теряют свою форму.

Фуллериты достаточно легко растворяются в неполярных растворителях: сероуглероде, толуоле, бензоле и т.д.

Твердый фуллерит является полупроводником и обладает фотопроводимостью. При облучении видимым светом электрическое сопротивление кристалла фуллерита уменьшается.

В кристалле фуллерита имеются октаэдрические и тетраэдрические полости, занимающие до 26 % объема, в которых могут находиться посторонние атомы. На каждую молекулу C<sub>60</sub> приходится одно октаэдрическое и два тетраэдрических междоузлия.

В результате легирования, т.е. заполнения междоузлий, структура фуллеритов перестраивается, и возможно формирование на его основе новых материалов с широким диапазоном свойств, а значит, возможностей.

При легировании фуллериты могут обладать металлической проводимостью и даже высокотемпературной сверхпроводимостью.

Например, при легировании фуллерита щелочными металлами – литием Li, натрием Na, калием K, рубидием Rb, цезием Cs (заполнении октаэдрических и тетраэдрических полостей) фуллерит становится электропроводным с возможным переходом в сверхпроводящее состояние при определенной критической температуре  $T_c$  (от 18 до 42,5 К).

В ближайшем будущем ожидается достижение температур 100 К, т.е. реализация высокотемпературной сверхпроводимости.

Открытие сверхпроводимости легированного фуллерита стимулировало интерес к нему уже не только как к уникальному физическому, но и практически важному объекту.

Исследования также показали, что поликристаллический фуллерит может служить сырьем для самого твердого и самого дорогого материала – алмаза. При этом для перевода фуллерита в алмаз требуются менее «жесткие» условия, чем для превращения поликристаллического графита в алмаз: давление  $P = 2 \cdot 10^5$  атм и комнатная температура; для перехода графит-алмаз необходимы следующие условия:  $P = (3 \dots 5) \cdot 10^6$  атм и  $T = 1200$  °С.

Число вариантов фуллереновых материалов уже сегодня насчитывает ~ 9000 (металлов, ферромагнетиков, сверхпроводников, полупроводников, полимеров).

Исследовательский бум в области знаний о фуллеренах и других углеродных наноструктурах настолько велик, что в последние годы даже создана новая научная дисциплина – фуллереноведение.

Другая форма углеродного наноматериала – *углеродные нанотрубки* – были открыты в 1991 г. (японским ученым С. Иидзима) и представляют собой молекулы с гигантским числом атомов. Такая молекула, например,  $C_{1000000}$ , представляет собой однослойную трубку с внешним диаметром  $\sim 1$  нм и длиной несколько десятков микрометров.

Углеродная нанотрубка представляет собой свернутую в виде цилиндра ленту с упаковкой атомов по типу графита, рис. 1.17.

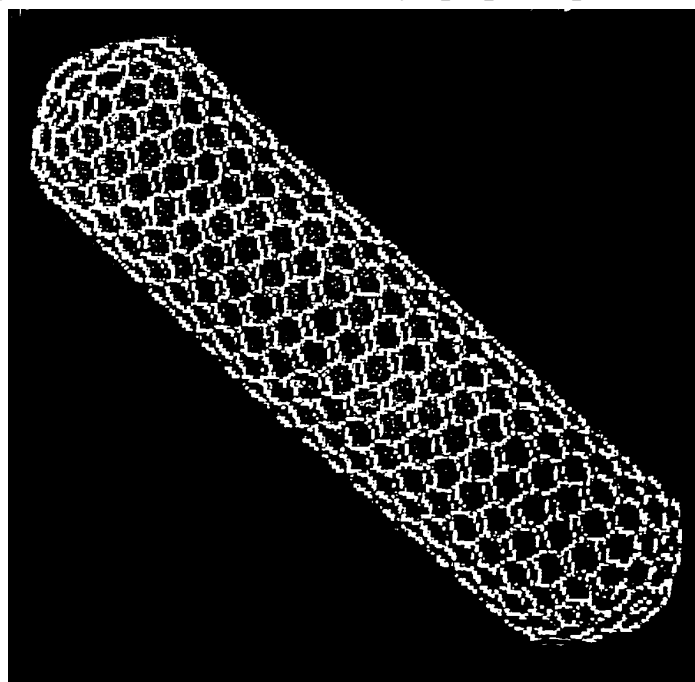


Рисунок 1.17 – Строение углеродной нанотрубки

На поверхности трубки атомы углерода расположены в вершинах правильного шестиугольника. Концы трубки закрыты с помощью шести правильных пятиугольников.

Т.е. фактически нанотрубки представляют собой «мячи»-фуллерены, вытянутые в трубки.

Рассматриваемая форма углерода занимает по своей структуре промежуточное положение между графитом и фуллереном. Однако многие свойства углеродных нанотрубок не имеют ничего общего ни с графитом, ни с фуллереном. Это позволяет рассматривать и исследовать нанотрубки как самостоятельный материал.

Среди уникальных свойств углеродных нанотрубок важнейшими являются следующие.

▼ **Высокие значения прочности и удельной прочности.** Несмотря на кажущуюся хрупкость и даже ажурность, нанотрубки демонстрируют высокие значения прочности на растяжение и на изгиб, см. рис.1.10.

Связи между атомами углерода в графитовом листе являются самыми сильными среди известных, поэтому бездефектные углеродные трубки на два порядка прочнее стали и приблизительно в четыре раза легче ее. Таким образом, удельная прочность нанотрубок ( $\sigma_b/\rho$ ) в 400 раз больше аналогичного параметра для стали.

Модуль Юнга  $E$  углеродных нанотрубок составляет от 1,28 до 5 ТПа (для стали  $E = 0,21$  ТПа), что определяет их высокую жесткость. При этом углеродные нанотрубки весьма упруги при изгибе, что обусловлено малой толщиной стенки нанотрубки ( $\sim 0,34$  нм), их практически бездефектностью; кроме того, углеродные кольца стенок в виде почти правильных шестиугольников при изгибе меняют свою структуру, но не рвутся.

Одной из важнейших задач технологии в области новых углеродных материалов заключается в создании нанотрубок «бесконечной» длины. Из таких трубок можно изготавливать легкие композитные материалы предельной прочности для нужд техники нового века. Это силовые элементы мостов и строений, несущие конструкции компактных летательных аппаратов, элементы турбин, силовые блоки двигателей с предельно малым удельным потреблением топлива и т.п.

В настоящее время научились изготавливать трубки длиной в десятки и сотни микрометров при диаметре порядка одного нанометра; преодолен также сантиметровый рубеж.

▼ **Электрические свойства.** Известно, что в кристаллическом графите проводимость вдоль плоскости слоя наиболее высокая среди известных материалов и, напротив, в направлении, перпендикулярном листу, мала.

Одной из причин высокой проводимости углеродных нанотрубок является очень малое количество дефектов, вызывающих рассеяние электронов. Поэтому ожидается, что электрические кабели, выполненные из нанотрубок, при комнатной температуре будут иметь электропроводность на два порядка выше, чем медные кабели. Дело за технологией, позволяющей производить трубки достаточной длины и в достаточном количестве.



При возможности использования нанотрубок в виде миниатюрных электрических проводников для изготовления электронных «чипов» решится проблема тепловыделения, которая является доминирующей при повышении информационной мощности чипов.

В то же время уникальной особенностью нанотрубок является то, что их электропроводимость зависит от их диаметра и хиральности (направления сворачивания трубки относительно графитового листа). В зависимости от этих факторов нанотрубки могут проявлять металлические или полупроводниковые свойства.

▼ **Электромеханические свойства.** Обнаружение электромеханического эффекта в углеродных нанотрубках стало настоящей сенсацией. Сущность электромеханического эффекта состоит в значительном изменении электрической проводимости нанотрубки даже при небольшом изгибе.

При подаче на нанотрубку внешнего потенциала она испытывает притяжение к контрэлектроду и изгибается на некоторый угол, т.е. способна преобразовывать электрическую энергию в механическую и обратно. Простейшими из возможных применений этого эффекта могут быть микрофон с активным преобразователем на основе нанотрубок, преобразователь электромагнитного сигнала в звуковые колебания, сверхминиатюрный транзистор и т.д.

▼ **Эффект свечения нанотрубок.** Обнаружен исследователями компании *IBM* и состоит в том, что наблюдается свечение углеродных нанотрубок при пропускании через них электрического тока. Свечение возникает при рекомбинации в узком поперечном слое потоков движущихся навстречу друг другу электронов и дырок (электронных вакансий).

▼ **Квантовые свойства.** Нанотрубки – уникальные протяженные квантовые объекты, поскольку их диаметр меньше длины волны электрона, а длина – макроскопическая, что является основой для их использования в качестве квантовых колец и нанокатушек, как цилиндрические резонаторы лазеров ультрафиолетового диапазона.

▼ **Свойства легированных нанотрубок.** Аналогично фуллеренам, в пустоты внутри нанотрубок также можно помещать атомы других веществ. Легирование нанотрубок примесями замещения или внедрения позволяет управлять в широком диапазоне электрическими, оптическими, механическими и другими свойствами и имеет большое значение для прикладных задач, поскольку нанотрубку, заполненную проводящим, полу-

проводящим или сверхпроводящим материалом, можно рассматривать как наиболее миниатюрный из известных к настоящему времени элементов микроэлектроники.

Электрические свойства такой необычной структуры значительно отличаются как от свойств простой, полый нанотрубки, так и от свойств нанотрубки с пустыми фуллеренами внутри.

**Капиллярные свойства.** Благодаря капиллярным эффектам в нанотрубки можно не только «загонять» атомы и молекулы поодиночке, но и буквально «вливать» вещество, что позволяет варьировать их свойства.

Это позволяет использовать нанотрубки как микроскопические контейнеры для безопасной перевозки химически и биологически активных веществ: белков, ядовитых газов, компонентов топлива и даже расплавленных металлов. Операция «запаивания» и «распаивания» концов нанотрубок уже вполне под силу современной технологии.

Свойства нанотрубок столь уникальны, что потенциал их использования превосходит потенциал любых других наноструктур.

На основе углеродных нанотрубок разрабатываются ультратонкие дисплейные панели, «электронная» бумага, транзисторы, *flash*-память и т.д.

Открыты и исследуются также неуглеродные нанотрубки, например, на основе карбонитридов бора ( $B_xC_yN_z$ ), нитрида бора BN, сульфида молибдена  $MoS_2$  и др.

Создан гибридный материал из нанотрубок, к которому привиты фуллерены, весьма перспективный для элементов микроэлектроники.

Основной проблемой практического применения углеродных наноматериалов является разработка дешевых и производительных методов их получения, поскольку их стоимость на мировом рынке пока чрезвычайно высока. Так, цена 1 г экстракта фуллеренов (смесь  $C_{60}$  и  $C_{70}$  в стандартном соотношении 85:15) составляет ~ 25 \$, фуллерена  $C_{60}$  – от 40 \$ при чистоте 99,5 % до 150 \$ при чистоте 99,9 %.

**Основными методами получения фуллеренов и углеродных нанотрубок** являются *возгонка* (переход в газовую фазу) *графита* с последующей *десублимацией* (переходом из газовой фазы в твердое состояние), а также *пиролиз углеводородов*.

Существует большое разнообразие указанных методов, которые непрерывно совершенствуются в направлении увеличения производитель-

ности установок и снижения себестоимости получаемых углеродных наноматериалов.

Наиболее распространенным и относительно простым методом синтеза фуллеренов является возгонка и десублимация графита в электрической дуге, горящей между графитовыми электродами в потоке инертного газа (чаще всего, гелия), с последующим выделением фуллерена из осаждающейся на стенках камеры фуллереносодержащей сажи. Производительность лучших мировых установок подобного типа – 100...130 г фуллерена в час.

Аналогичная технология, но при других режимах горения дуги, может быть применена и для получения нанотрубок, выделяемых из катодного осадка на электроде. Производительность установок – до 70 г/час.

Реализованы также методы получения нанотрубок при лазерно-термической возгонке графита, возгонке в плазме и т.д.

Большое число вариантов имеет также метод получения нанотрубок пиролизом углеводородов, который в большей степени подходит для крупномасштабного производства и позволяет производить не только сами углеродные наноматериалы, но и определенные структуры на подложках, макроскопические волокна из нанотрубок, композиционные материалы.

Разработчики и исследователи фуллереноподобных материалов предполагают технологический прорыв во многих областях науки и техники в ближайшие десятилетия.

Не стоит в стороне от нового научного направления в области наноматериалов и Украина. В 2000 г. начато производство фуллеренов и нанотрубок в Институте проблем материаловедения НАН Украины, где проводятся исследования механизмов их образования с целью удешевления продукта, так как чем более доступными будут эти материалы, тем более широкий спектр областей применения они найдут.

Изучение структуры и свойств наноматериалов проводятся во многих научно-исследовательских и учебных институтах Украины, в том числе в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины, Институте общей и неорганической химии НАН Украины, НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, в НТУ «ХПИ» и др.

### **1.8. Ресурсосбережение в металлургическом производстве и рециркуляция металлов**

Одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством в XXI веке, является проблема соответствия (а точнее, несоответствия) растущих потребностей человечества с возможностью их удовлетворения ресурсами нашей планеты. Одной из отраслей, к деятельности которой в области ресурсосбережения человечество предъявляет серьезные претензии, является металлургия.

Эта проблема весьма актуальна именно сегодня, когда темпы прироста объема потребления продукции металлургического производства особенно велики. По оценкам специалистов, производство стали в период с 2010 по 2015 гг. вырастет по сравнению с концом 90-х годов в 1,5...2 раза, до 1400...1600 млн. т/год, что, безусловно, требует особого подхода к проблеме исчерпаемости природных ресурсов.

Кроме того, эффективно в настоящее время используется лишь часть выплавляемой стали. Средний расходный коэффициент от слитка к годному прокату составляет 1,33; это означает, что из каждых 100 млн. т жидкой стали, разлитой в слитки, получают только 73...75 млн. т годного проката (основная причина потерь – головная и хвостовая обрезь слитков). При расходном коэффициенте в машиностроении, т.е. на пути от проката к готовой детали, в среднем близком к 0,8, около 20% годного проката уходит в стружку, обрезь, облой и т.п. В результате масса готовых изделий, полученных из 100 млн. т жидкой стали, составляет 58...64 млн. т.

Обеспечение более высокой технической культуры производства стали, основанной на применении новых эффективных технологий производства и обработки стали, в том числе переход на производство стали конвертерным способом и электроплавку, применение современных методов внепечной обработки стали, широкое внедрение непрерывной разливки стали дает более оптимистичные показатели – из каждых 100 млн. т выплавленной стали эффективно используются уже 75...85 млн. т.

Концепция ресурсосбережения, разработке которой в настоящее время уделяется много внимания, требует комплексного подхода и анализа всех аспектов металлургического производства – от добычи сырых материалов из недр, более полного использования сырья, рис. 1.18, оптимизации металлургических процессов и внедрения новых перспективных технологий до оптимизации процессов рециркуляции отходов металлургического производства. Уместно вспомнить слова известного русского металлурга И.П. Бардина: «Процесс лишь тогда может считаться совершенным, когда отходы одних переделов становятся сырьем для других».

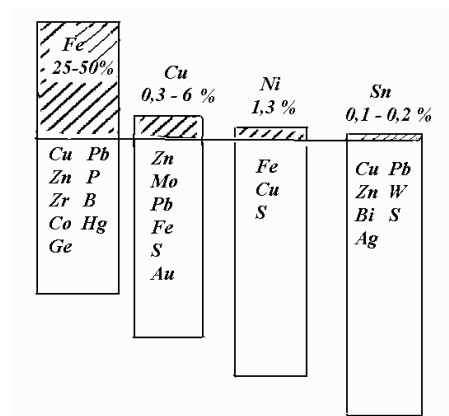


Рисунок 1.18 – Степень извлечения металлов из руд (заштрихованная часть выше горизонтальной линии)

В производство металлы поступают из двух основных источников: первичный – из руды; вторичный – в результате рециркуляции, т.е. вторичного использования.

Поэтому весьма важным шагом в решении проблемы ресурсосбережения является рециркуляция металлов, т.е. многократное возвращение металла в производство (использование лома металлов), что позволяет не только избежать истощения природных рудных ресурсов, но и сэкономить до 60...80 % энергии по сравнению с получением металлов из руды.

Доля рециркулирующего металла играет важнейшую роль в определении скорости истощения ресурсов. Сегодня степень рециркуляции многих промышленно важных металлов остается недостаточно высокой, рис. 1.19.

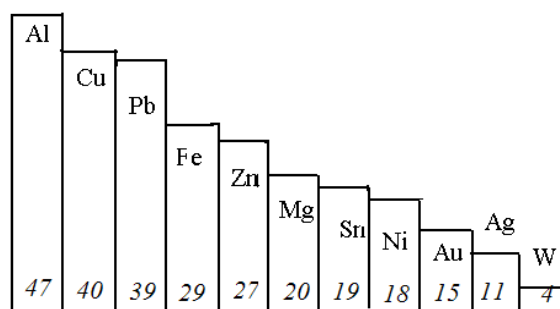


Рисунок 1.19 – Степень рециркуляции металлов, %

Для реализации рециркуляции металлического лома необходим учет следующих факторов:

1) распределения потенциального лома (скрапа), как географического, так и по фракциям размеров. Чем крупнее производство, чем больше размеры изделия и локальное размещение производимого изделия, тем легче перерабатывать лом;

2) химического состава лома, который является основой для классификации металлического лома. Например, медный скрап подразделяется примерно на 10 групп по содержанию других металлов (компонентов сплава), алюминий – на 5 в соответствии с содержанием железа, магния, олова и цинка.

Методы рециркуляции могут быть разными. Чаще всего вторичный металл с примесями вновь используется аналогично первичному в традиционных процессах получения металлов. Например, стальной лом используется в качестве одного из исходных материалов в конвертерном, мартеновском, электродуговом производствах, является основным материалом при производстве стали индукционным методом. Кстати, свыше половины всей стали в Украине выплавляется из вторичных металлов. Чем лучше обеспечены заводы ломом, тем дешевле обходится продукция.

Химические методы пока не нашли должного применения в процессе регенерации металлов, хотя достаточно перспективным является метод селективного растворения сплава с помощью применения расплава солей. Например, медь можно регенерировать из автомобильных стартеров, генераторов и арматуры с помощью расплава хлористого кальция  $\text{CaCl}_2$ .

Достаточно распространены электрохимические методы при регенерации вторичных металлов из расплавов и растворов. Например, электрохимические процессы используются при извлечении алюминия, меди, свинца, серебра и золота из лома электронной аппаратуры.

Из цветных металлов наиболее высока доля вторичного металла в общем объеме производства алюминия, использование рециркуляции этого металла дает существенные снижения затрат электроэнергии – на 18 %.

Перспективные ресурсосберегающие технологии рециркуляции черных и цветных металлов сегодня являются объектом пристального внимания ученых всех стран мира, так как использование вторичного сырья способствует решению глобальных проблем человечества – энергосбережения и экологической безопасности. Горнообогатительный комплекс Украины включает уже сегодня 35 предприятий вторичного сырья, и число их предполагается увеличивать.

В некоторых странах достигнут достаточно высокий уровень использования вторичных металлов, прежде всего, это страны с низкими энергетическими природными ресурсами и наиболее высокими ценами на электроэнергию по сравнению со среднемировыми. Так, например, в Японии, уровень рециркуляции алюминия составляет 100% (в Украине – 10 %, в России – 13%, среднемировой уровень – 47 %, см. рис. 1.19).

Кроме экономии рудного сырья, сегодня достаточно остро стоят в металлургии также вопросы экономии энергоресурсов, водопотребления и др.

Металлургия является высокочрезвычайно технологичной и в целом потребляет около 20 %, а черная металлургия – около 10 % всех энергоресурсов. Стоимость энергии составляет примерно половину стоимости стальной заготовки. Энергоемкость продукции как в настоящем, так и в ближайшем будущем следует рассматривать в качестве основного показателя, определяющего положение материала на рынке материалов.

Современная металлургия базируется на использовании горючих ископаемых (уголь, природный газ, нефть), электроэнергии, кислорода, производство которого связано со значительным расходом электроэнергии. Данные энергоресурсы относят к первичным.

Уровень потребляемой в металлургических процессах энергии достаточно высок, см. табл. 1.1.

Наряду с решением проблем экономии первичных энергоресурсов достаточно актуальны проблемы использования вторичных энергетических ресурсов, к которым относят нагретые до высоких температур отходящие газы металлургических агрегатов, а также отходы, содержащие горючие компоненты. Вторичные энергоресурсы условно делят на высокопотенциальные (нагретые до температур 1000...1700 °С) и низкопотенциальные (отходящие газы с температурой 200 °С и менее).

На практике сегодня действуют многочисленные эффективные способы утилизации физического и химического тепла высокопотенциальных энергоресурсов.

Например, покидающие рабочее пространство металлургических агрегатов горячие дымовые газы пропускают через котел-утилизатор с целью получения пара; используют горячие газы для предварительного подогрева металлолома перед загрузкой в сталеплавильный агрегат; организуют передачу тепла горячих газов воздуху или газу, подаваемому в металлургический агрегат.

Проблема использования низкопотенциальных вторичных энергоресурсов также уже имеет несколько вариантов решения, проверенных на практике. Например, использование данных газов для выработки электроэнергии на базе специальных турбин, работающих на легковоспламеняющихся рабочих телах, что особенно актуально для стран с низкими энергоприродными ресурсами – Японии, Южной Кореи, Италии.

Данные источники могут также использоваться для обогрева грунта

(теплиц). По предварительным расчетам, крупный металлургический комбинат может отапливать низкотемпературными (80...90 °С) вторичными энергоресурсами до 150 га теплиц и обеспечивать производство до 60 тыс. т овощей и зелени. Использование энергии сжатых газов может быть реализовано для выработки холода, необходимого, например, для производства и хранения плодоовощной продукции. Использование углекислоты, извлекаемой из отходящих газов, может быть использовано для получения сухого льда, который можно использовать для быстрой заморозки, хранения, сушки продуктов питания. И эти перспективы далеко не единственные...

Не менее актуальны проблемы экономии водных ресурсов, так как металлургия – одна из водопотребляемых отраслей промышленности. Только черная металлургия потребляет 13...15 % общего количества воды, расходуемого всеми отраслями промышленности. Удельный расход воды на 1 т стали, включая все технологические операции по добыче и подготовке руды, кокса, а также дальнейшему переделу чугуна в сталь, и далее – в прокат, трубы и т.д., превышает 260 м<sup>3</sup>. К сожалению, в этот показатель входит значительное количество воды из природных источников, несмотря на предпринимаемые меры по эффективному использованию оборотной воды.

Важная роль в проблеме рационального использования и охраны водных ресурсов принадлежит нормированию водопотребления и водоотведения, использованию нетрадиционных источников водоснабжения, таких как поверхностный сток, сточные воды городов после биологической очистки, использование дождевых вод и т.д.

### **1.9. Решение экологических проблем в металлургии**

С проблемами ресурсосбережения тесно связаны и экологические проблемы в металлургическом производстве, которое является одним из наиболее сильных загрязнителей окружающей среды в современном мире. По вредным выбросам в атмосферу металлургия занимает второе место, уступая только энергетике.

Лишь один металлургический завод полного цикла, производящий 10 млн. т стали в год, до введения строгих мер контроля выбрасывал ежегодно в атмосферу более 200 тыс. т пыли, 50 тыс. т соединений серы, 250 тыс. т оксида углерода, оксидов азота и других веществ. Работа заводских агрегатов сопровождается такими вредными факторами, как шум и вибрация.

Металлургическое производство также сопровождается образованием большого количества шлака, направление которого в шлаковые отва-



лы занимает земельные угодья, загрязняет почву и водный бассейн, требует организации сети железнодорожных путей и т.д.

Расходы на защиту окружающей среды, включая водный и воздушный бассейны, на борьбу с шумами и вибрацией, извлечение ценных отходов производства непрерывно растут. Они превысили 5 %, а при строительстве некоторых заводов достигают 20 % от общих капиталовложений.

Основными направлениями защиты воздушного бассейна являются:

- защита от видимых загрязнений и выбросов в виде отходящих газов и находящихся в их основе пыли, копоти, дыма через трубу или газоотсасывающие устройства;
- борьба с «неорганизованными» загрязнениями, выделяемыми в атмосферу в процессе перевозки, складирования сыпучих материалов и металлошихты, а также в процессе транспортировки и перелива жидкого чугуна, шлака, стали, ферросплавов и лигатуры;
- борьба с невидимыми загрязнениями токсического характера, которые иногда могут оказаться более опасными, чем видимые;
- использование в доменном процессе пылеугольного топлива;
- применение технологий прямого восстановления железа;
- увеличение доли электроплавки, в том числе строительство мини-заводов.

Защита воздушного бассейна от выбросов сопровождается улавливанием и последующей утилизацией этих выбросов.

Весьма остро в мире сегодня стоит также проблема снижения выбросов «парниковых газов», оказывающих опасное антропогенное воздействие на климатическую систему Земли. Огромную долю выбросов «парниковых газов» дает черная металлургия. «Лидерами» по многим специфическим вредным выбросам ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) являются коксохимическое и агломерационное производства, серьезные проблемы имеются и в сталеплавлении. Эти проблемы должны учитываться и решаться при разработке ресурсосберегающих технологий и соответствующего оборудования.

### **Вопросы для самостоятельного контроля**

1. Каковы основные направления развития металлургического производства?
2. Укажите основные тенденции развития мировой черной металлургии.
3. Какова структура черной металлургии в Украине и в чем заключается ее приближение к оптимальной?
4. Назовите основные предприятия черной металлургии в Украине.

5. В чем заключается бесчугунное производство стали и в чем его преимущество перед традиционными процессами выплавки стали?
6. Каковы основные стадии прямого твердофазного восстановления железа из железорудных материалов?
7. Каковы перспективы развития цветной металлургии в мире и в Украине?
8. Где находят применение высокочистые металлы?
9. Какие Вы знаете основные методы получения высокочистых металлов?
10. Дайте краткую характеристику основных перспективных методов производства металлов.
11. Каковы особенности перспективных методов производства металлов?
12. Опишите сущность методов бактериального выщелачивания и метода ионитов. Для получения каких металлов они применяются?
13. В чем заключается плазменный метод получения металлов?
14. Что такое «космическая металлургия»?
15. Какие материалы называют композиционными, в чем особенность их строения и свойств?
16. Какие методы применяются для получения композиционных материалов?
17. Каковы наиболее рациональные области применения композиционных материалов?
18. Что такое «нанотехнологии»?
19. Какие материалы относятся к наноматериалам?
20. В чем специфика свойств наноматериалов по сравнению с традиционными материалами?
21. Назовите основные методы получения наноматериалов различных групп.
22. Укажите основные перспективные области применения наноматериалов.
23. Назовите основные виды углеродных наноматериалов. В чем их особенность?
24. Какова структура фуллеренов и каковы их свойства?
25. Что представляют собой углеродные нанотрубки?
26. Назовите основные характерные свойства углеродных нанотрубок и возможные области их применения.
27. Каковы пути решения проблемы ресурсосбережения в металлургическом производстве?
28. В чем заключается рециркуляция металлов?
29. Как используются вторичные энергоресурсы в металлургическом производстве?
30. Каковы пути решения экологических проблем в металлургии?



## 2. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Литейное производство* является сегодня основной заготовительной базой машиностроения и в перспективе сохранит свое лидирующее положение. На долю литых заготовок и деталей в среднем приходится 50...70 % массы (в станкостроении до 90 %) и 20 % стоимости машин.

Только методами литья можно получить сложные по конфигурации и геометрии заготовки из черных и цветных сплавов с высоким (75...95 %) коэффициентом использования металла.

Как правило, литые детали несут высокие нагрузки в машинах, механизмах и во многом определяют их эксплуатационную надежность, точность и долговечность.

### 2.1. Структура современного литейного производства

Структуру литейного производства можно рассматривать с разных позиций:

- по структуре выпуска отливок по сплавам;
- по потреблению отливок различными отраслями промышленности;
- по номенклатуре производимых отливок;
- по применению различных технологических процессов изготовления отливок;
- по распределению литейных цехов по объему производства.

***Структура выпуска отливок по сплавам*** на рубеже XX...XXI веков претерпела некоторые изменения. Основную массу отливок во всех странах в середине XX века получали из чугуна – до 85 %, до 10 % – из стали и лишь 5 % – из цветных сплавов. К началу III тысячелетия доля чугунных отливок несколько снизилась, но они по-прежнему преобладают (73 %), доля цветных сплавов увеличилась до 20 %, а стальных соответственно снизилась – до 7 %.

Сохранение высокой доли чугунных отливок в общем объеме выпуска в наше время связано прежде всего с резким увеличением производства отливок из высокопрочного чугуна. Доля отливок из высокопрочного чугуна в общем мировом производстве отливок в 2005 г. составила 30 % (в середине XX века – 2 %). Замена серого чугуна высокопрочным позволила

повысить надежность и снизить металлоемкость изделий за счет уменьшения толщины стенок отливок.

Другой тенденцией современного литейного производства является существенное сокращение выпуска отливок из ковкого чугуна, требующего значительных энергозатрат на производство (путем графитизирующего отжига отливок из белого чугуна). Сегодня ковкий чугун интенсивно вытесняется высокопрочным и его доля составляет всего 1,7 % по сравнению с 5 % в середине прошлого века.

Снижение доли стальных отливок в общем объеме выпуска литых заготовок свидетельствует о завершении процессов интенсивной индустриализации в промышленно развитых странах, снижении удельного веса тяжелой промышленности. Кроме того, прослеживается определенная конкуренция альтернативных методов изготовления стальных заготовок и частичная замена стальных отливок отливками из высокопрочного чугуна.

Выпуск отливок из цветных сплавов растет в основном за счет отливок из алюминиевых сплавов, выпуск которых в начале XXI века увеличился в 13 раз по сравнению с серединой XX века и продолжает устойчиво расти. Алюминиевые сплавы прочно заменяют «тяжелые» цветные сплавы – медные и цинковые, доминировавшие в XX веке. Доля алюминиевых сплавов составляет ~ 16 % (по сравнению с 6,5 % в середине XX века).

Предсказывается также рост потребления отливок из магниевых сплавов, прежде всего в автомобильной промышленности при существенном снижении их стоимости. Крупные автомобильные корпорации – *Ford*, *General Motors*, *Wolkswagen* увеличивают использование магния в своей продукции.

По экспертным оценкам, **производство отливок по отраслям** сегодня составляет:

- ♦ автомобильная и тракторная отрасли – 34 %;
- ♦ строительное и дорожное производство – 11 %;
- ♦ тяжелое и энергетическое машиностроение – 16 %;
- ♦ электротехническое, химическое машиностроение и легкая промышленность – 8 %;
- ♦ станкостроительное и инструментальное машиностроение – 6 %;
- ♦ металлургия – 17 %;
- ♦ другие отрасли – 8 %.

В последние годы происходят серьезные изменения и в **номенклатуре отливок**, особенно это касается отливок из чугуна. Из литейных цехов постепенно ушли многие толстостенные отливки из серого чугуна (напорные трубы, соединительные детали трубопроводов) в связи с переводом их на высокопрочный чугун, металлургические изложницы – в связи с развитием непрерывной разливки стали.

Важным фактором эффективности литейного производства является его концентрация, которая обуславливает целесообразный уровень механизации и автоматизации технологических процессов, что определяет такие технико-экономические показатели, как производительность оборудования, себестоимость продукции и др.

Современная ситуация в литейном производстве развитых стран – результат многолетнего процесса промышленного развития, постепенного увеличения мощности предприятий, особенно в отраслях массового производства (например, автомобильной), где уже в первой половине XX в. создавались крупные литейные цехи с числом работающих более 1000 человек.

В результате конкурентной борьбы количество литейных цехов в промышленно развитых странах сокращается при росте концентрации производства.

В то же время в условиях жесткой конкуренции устойчиво сохраняется большое число относительно мелких литейных предприятий, конкурентоспособность которых в определенной нише производства определяется такими факторами, как низкие накладные расходы, оперативность при выполнении разнообразных, особенно мелкосерийных, заказов и т.д. В этих условиях очевидна рентабельность небольших цехов специальных способов литья, выпускающих точные отливки.

При анализе структуры литейного производства **в плане применяемых технологических процессов** следует отметить увеличение доли специальных методов литья.

Отличительными особенностями специальных способов литья по сравнению с литьем в песчано-глинистые формы, которое сегодня лидирует в промышленности, являются более высокая точность и качество поверхности отливок, меньшие припуски на механическую обработку, а в некоторых случаях – ее полное отсутствие (способы точного литья), повышение механических свойств отливок, уменьшение потерь от брака и, что очень важно в современном мире, повышение экологичности.

При этом отливки, полученные специальными методами литья, отличаются более высокой себестоимостью. Экономическая целесообразность замены литья в песчано-глинистые формы тем или иным специальным способом зависит от масштаба производства, формы и размеров отливок, применяемых сплавов; она определяется на основе тщательного анализа всех затрат.

Некоторые перспективные технологии точного литья (литья под давлением, по выплавляемым и газифицируемым моделям) и пути их совершенствования рассматриваются ниже, п. 2.2.

## **2.2. Технологии точного литья**

### **2.2.1. Литье под давлением**

Одной из основных тенденций современного литейного производства является предпочтительное развитие высокопроизводительных способов производства деталей сложной конфигурации с высокой точностью и качеством поверхности, с высоким коэффициентом использования металла (КИМ).

Одной из таких технологий является *литье под давлением*, суть которого состоит в том, что металл под давлением от 30 до 300 МПа принудительно заполняет металлическую пресс-форму со скоростью 0,5...140 м/с (см. курс «Технология конструкционных материалов»).

Это устраняет возможность образования усадочных раковин и, таким образом, дает возможность отказаться от прибылей. Благодаря давлению на металл снижается газовая пористость, повышается плотность и прочность отливок. Возможно изготовление тонкостенных (до 0,5 мм) отливок с глубокими полостями, отверстиями малого диаметра (до 2 мм), готовой резьбой. Достоинствами способа являются также высокая производительность и взаимозаменяемость отливок.

Получаемые данным способом изделия в большинстве случаев являются готовыми деталями (КИМ = 0,95) и применяются во многих отраслях промышленности – автомобилестроении, оптико-механической, бытовой промышленности. Из-за высокой стоимости оборудования литье под давлением целесообразно в массовом производстве.

Перспективными модификациями литья под давлением являются литье под регулируемым давлением, литье под всесторонним газовым

давлением, литье выжиманием и др.

Развитие техники и технологии литья под давлением, появление новых модификаций данного способа способствует расширению областей и повышению эффективности применения получаемых деталей.

### 2.2.2. Литье по выплавляемым и газифицируемым моделям

Другим методом, также относящимся к точным технологиям литья, является *литье по выплавляемым моделям*. Метод заключается в получении отливок в неразъемных разовых огнеупорных формах (в основном, тонкостенных керамических, реже – монолитных гипсовых), изготавливаемых с помощью легкоплавких выплавляемых, в основном, воскообразных, составов (см. курс «Технология конструкционных материалов»).

Данным способом можно получать отливки массой от 0,02 до 100 кг сложной конфигурации, в том числе тонкостенные (до 0,5 мм) из сплавов с любой температурой плавления, а также из труднообрабатываемых резанием и давлением сплавов (жаропрочных, жаростойких сталей и сплавов, быстрорежущих инструментальных сталей). Получают детали приборостроения, мелкие детали автомобилестроения, тракторостроения, турбинные лопатки, режущий инструмент (фрезы, сверла). Технология также применяется в медицине (стоматологии), для изготовления художественных и ювелирных изделий.

Процесс механизирован и автоматизирован. В массовом производстве используют автоматические линии литья по выплавляемым моделям.

Кроме выплавляемых, используют также газифицируемые модели, удаляемые газифицированием (разложением) модельного состава при заливке полости формы металлом, выжигаемые, а также (реже) – растворяемые.

Сегодня технология литья по выплавляемым и газифицируемым моделям достаточно распространена в промышленности и является одной из наиболее перспективных технологий получения точных заготовок небольшой массы (до 5 кг) сложной конфигурации.

Данные технологии имеют технико-экономические преимущества по сравнению с другими технологиями литья, табл. 2.2, обладают определенной универсальностью и мобильностью, что очень важно при многономенклатурности и малосерийности производства.



Отливки, полученные литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ) и литьем по газифицируемым моделям (ЛГМ), мало отличаются по размерам, форме и качеству поверхности от готовой детали.

Точность и качество получаемых методами ЛВМ и ЛГМ отливок зависят от многих факторов: от точности и качества пресс-форм, в которых получают модели, технологии монтажа модельных блоков, эксплуатационных свойств формируемой на модельных блоках керамической формы-оболочки, операций выплавления моделей из форм, формовки оболочек, а также процессов заливки, выбивки и очистки отливок.

В значительной степени точность и качество отливок зависят от точности и качества выплавляемых, газифицируемых, выжигаемых моделей, поэтому рациональный выбор модельного состава, расширение номенклатуры используемых модельных составов являются одним из важнейших направлений развития данных технологий.

В последние годы в Украине и за рубежом все большее распространение получает метод литья по *газифицируемым моделям*.

Высокое качество отливок, получаемых ЛГМ, допускает эффективное использование процесса при изготовлении отливок, которые традиционно получали ЛВМ. Несомненное преимущество ЛГМ перед ЛВМ – простота осуществления процесса. Практически исключены или сведены к минимуму операции нанесения покрытия, формовки, прокаливания форм, выбивки и очистки отливок. Применение ЛГМ взамен ЛВМ позволяет сократить расход дорогостоящих формовочных материалов до 10 раз, электроэнергии – в 2...3 раза, а трудоемкость – в 3...4 раза. Особенно эффективно применение данной технологии при литье таких деталей, как рабочие колеса, шнеки и др. из различных сплавов, в том числе из высокохромистого чугуна. В настоящее время освоен выпуск более 700 наименований отливок различной массы, габаритов и назначения из железоуглеродистых и цветных сплавов методом литья по газифицируемым моделям.

Основной материал газифицируемых композиций – термопласты, например, полистирол вспенивающийся ПСВ и пенополистирол блочный, обеспечивающие теплоустойчивость моделей в процессе ускоренной сушки слоев оболочковых форм при 70...80 °С.

Выбор полистирола в качестве основного компонента модельных составов обусловлен соответствием его свойств требованиям к модельным составам. Он обладает низкой зольностью – 0,04 % (зольность – относи-

тельная масса твердого остатка при сжигании навески модельного состава); низкой плотностью –  $1050 \text{ кг/м}^3$ ; теплостойкостью до  $70...80 \text{ }^\circ\text{C}$ ; невысокой температурой плавления  $T_{\text{пл}} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ ; достаточно высокой прочностью –  $\sigma_{\text{изг}} = 10...14 \text{ МПа}$ ; малой усадкой –  $0,2...0,3 \text{ \%}$  (под усадкой понимают показатель относительного изменения линейных размеров модели при ее затвердевании и охлаждении до комнатной температуры).

В единичном производстве модели из блочного полистирола изготавливают механической обработкой стандартных плит и блоков вручную с помощью пил, рубанка и на станках (строгальных, фрезерных, сверлильных и шлифовальных). В крупносерийном производстве модели из вспенивающегося полистирола получают на термопластоавтоматах путем тепловой обработки гранул из полистирола.

Полистирол вспенивающийся – композиция, представляющая собой бесцветные гранулы, содержащие основу – полистирол (типичный представитель термопластов) и порообразователь – изопентановую фракцию. При нагреве до  $T = 80...100 \text{ }^\circ\text{C}$  полистирольная основа гранул размягчается, а порообразователь испаряется, и его пары оказывают изнутри давление на стенки гранул, в результате чего гранулы увеличиваются в объеме, а их плотность уменьшается.

Иногда в качестве газифицируемых составов при производстве особо точных отливок сложной пространственной конфигурации, например, лопаток газовых турбин, используют тугоплавкие и высокопрочные составы на основе канифоли и полистирола.

Новым и перспективным направлением литья по газифицируемым моделям является изготовление *газифицируемых моделей с имплантатами*, т.е. специально вводимыми в модель из вспенивающегося полистирола легирующими и модифицирующими добавками – порошкообразными металлическими присадками, которые при выжигании модели диффундируют в металл отливок. Данный метод позволяет управлять структурой и свойствами отливок, получать отливки с дифференцированными по сечению свойствами и, в итоге, создавать новый класс отливок с функциональным поверхностным слоем – износостойким, антифрикционным, коррозионностойким.

Технология пока находится в стадии разработки и исследования, тем не менее, уже есть результаты ее практического применения. Например, украинскими учеными – сотрудниками Физико-технологического ин-

ститута металлов и сплавов НАН Украины, получен нульмерный (см. п. 1.6) литой композиционный материал, представляющий собой алюминиевый сплав АК12, армированный интерметаллидом FeCr (~ 10 %), который в дисперсном виде имплантирован в газифицируемую модель. Полученный с помощью новой технологии материал имеет более высокие механические и эксплуатационные свойства, чем базовый сплав АК12 и рекомендован для промышленного использования как легкий износостойкий конструкционный материал.

Аналогичная методика исследуется также применительно к стальным отливкам для создания на их поверхности науглероженного слоя.

Важнейшими и принципиально новыми направлениями развития технологии литья по выплавляемым и газифицируемым моделям являются использование литейной оснастки, полученной с применением технологии *самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС)*, а также технологий *ускоренного прототипирования (Rapid Prototyping)*.

Данные технологии рассматриваются в п. 2.3 и в п. 2.4.

## **2.3. Применение самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в литейном производстве**

### **2.3.1. Сущность и механизм СВС-процессов**

Одной из весьма перспективных современных технологий является *самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС)*, возникший вначале как новый процесс синтеза неорганических веществ и представляющий в настоящее время самостоятельную научно-техническую область исследования, лежащий в основе многих принципиально новых технологий III тысячелетия – СВС-процессов.

Суть самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, открытого российскими учеными (Мержановым А.Г., Боровинским И.П., Шкиро В.М. и др.) в 1967 г., состоит в следующем. После локального инициирования экзотермической (т.е. идущей с выделением большого количества тепла) химической реакции – реакции горения – в тонком слое смеси исходных веществ (реагентов) фронт реакции самопроизвольно распространяется по всей системе благодаря теплопередаче от горящих продуктов реакции к ненагретым исходным веществам, в которых также инициируется

реакция. При этом в результате горения образуются не газы, а твердые вещества – конечные продукты. Такой процесс получил название «твердое пламя» и был зарегистрирован как научное открытие.

Локальное инициирование реакции на поверхности системы осуществляется путем подвода кратковременного теплового импульса – электроискрового разряда, лазерного луча и др., причем длительность инициирования обычно намного меньше времени сгорания исходной шихты.

Благодаря высоким значениям скорости и температуры горения, скорости нагрева вещества в волне самораспространяющийся высокотемпературный синтез относят к категории экстремальных химических процессов. Наиболее часто реализуемые значения некоторых характеристик СВС-процесса следующие:

температура зажигания	800...1200 К;
температура в зоне синтеза	2300...3800 К;
мощность зажигания	10200 кал/(см <sup>2</sup> · с);
скорость распространения фронта горения	0,1...20 см/с;
скорость нагрева вещества в волне	10 <sup>3</sup> ...10 <sup>6</sup> град/с.

Данный метод синтеза отличается рядом специфических черт от существующих способов получения неорганических соединений. К ним относятся: высокие температуры и малое время синтеза, возможность управления процессом и получение материалов с определенными физико-механическими свойствами, незначительные внешние энергозатраты и простота оборудования, возможность синтеза больших количеств продукта и его чистота. В оптимальных условиях происходит почти полное превращение исходных продуктов в конечный продукт чрезвычайно высокой, до 99,99 %, чистоты.

Реагенты (исходные вещества) в СВС-процессах используются в виде тонкодисперсных порошков, тонких пленок, жидкостей и газов. Наиболее распространены два типа систем: смеси порошков (спрессованные или насыпной плотности) и гибридные системы газ-порошок, жидкость-порошок.

Шихта в СВС-процессах может находиться на открытом воздухе, в вакууме, в инертном или реагирующем газе под давлением.

В создании СВС-системы в качестве реагентов могут участвовать все химически активные при высоких температурах вещества (химические элементы, индивидуальные соединения, многофазные структуры) и инерт-

ные вещества в качестве наполнителей или разбавителей. В качестве реагентов используется также минеральное сырье и промышленные отходы. Условиями для подбора компонентов СВС-системы являются следующие: экзотермичность взаимодействия реагентов, образование полезных твердых продуктов, техническая и экономическая целесообразность.

Продукты СВС представляют собой твердые вещества произвольной формы, разных размеров. Это порошки разной дисперсности, слабо связанные конгломераты частиц, спеки и слитки разной прочности, пленки, кристаллы. Масса продуктов зависит от ее начальных значений и, в некоторой мере, от механизма процесса.

В однородных исходных системах макроструктура обычно однородна, в гибридных системах может иметь место различие состава по сечению образца. В некоторых случаях неоднородная структура создается преднамеренно, например, в многослойных композитах, градиентных материалах.

Химический и фазовый состав конечных продуктов определяется составом исходных продуктов, их диаграммами состояния, полнотой сгорания, условиями охлаждения.

Продукты СВС обычно имеют поликристаллическую структуру с размерами кристаллитов 1...5 мкм. Известны также примеры получения наноразмерных, аморфных, а также крупнокристаллических структур с размерами кристаллов до 3 мм. Размеры кристаллитов зависят от скорости охлаждения образца после горения, кинетики кристаллизационных и рекристаллизационных процессов.

Пористость сплошных (не дисперсных) продуктов горения может изменяться практически от нулевого значения (компактные материалы) до высоких значений (90...95 %, пеноматериалы).

Методом СВС получают:

- бескислородные тугоплавкие соединения, оксиды, интерметаллиды, фосфида, гидриды; всего синтезировано свыше 150 тугоплавких соединений практически всех классов;
- восстановленные элементы (бор, титан, молибден);
- гетерогенные неорганические материалы, в том числе керамику, металлокерамику, минералокерамику, композиты;
- некоторые органические соединения;
- полимеры.

Кроме синтеза, СВС используют также для нанесения покрытий и получения консолидированных (монокристаллических) материалов.

В настоящее время известны следующие технологические типы СВС:

- ▲ химический синтез – получение бесформенных спеков и их переработка в порошки;

- ▲ СВС-спекание – получение изделий путем придания шихте определенной формы и ее сохранение в процессе сжигания;

- ▲ силовое СВС-компактирование – уплотнение горячих продуктов горения путем различных механических воздействий;

- ▲ технология высокотемпературных СВС-расплавов, или СВС-металлургия – сжигание высококалорийных смесей с образованием продуктов в виде расплава с дальнейшей его металлургической переработкой;

- ▲ СВС-сварка – проведение СВС-процесса в зазоре между свариваемыми деталями;

- ▲ газотранспортная СВС-технология – использование газотранспортных процессов в волне горения для нанесения покрытий на введенные в шихту детали, в том числе для нанесения жаропрочных и износостойких покрытий на машиностроительные детали;

- ▲ синтез жаропрочных сплавов и керамики;

- ▲ новым и перспективным процессом является СВС-литье, о котором будет идти речь ниже, в п. 2.3.2.

Продукты СВС могут применяться в различных отраслях промышленности: машиностроении, металлургии, химической промышленности, электротехнике и электронике, авиационно-космической промышленности, строительстве, уже известны применения СВС-продуктов в медицине, научном приборостроении.

Использование СВС во многих случаях приводит к экономии всех видов продукции, а также позволяет решать уникальные задачи, например, прямой синтез крупногабаритных изделий.

Являясь изобретением России, СВС как научно-техническая область получил сегодня международное признание. Активно ведутся работы в данной области в 49-ти странах, в том числе в США, Японии, Китае, Польше, Корее, Италии, Испании, Израиле, а также в Украине, Беларуси, Грузии.

В Украине, благодаря совместным исследованиям ученых Института проблем материаловедения АН Украины и российских ученых, технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза внедрена для процессов производства абразивного инструмента и шлифовальных паст из карбида титана. Разрабатываются также процессы по производству твердосплавного инструмента с использованием СВС-порошков карбида вольфрама повышенной дисперсности.

Основными направлениями в развитии СВС-процессов являются создание теории процесса, задачи создания материалов высокого качества с заранее заданными эксплуатационными свойствами, диагностика СВС-продуктов, выявление эффективных областей применения СВС-продукции в технике, перевооружение многих отраслей промышленности и перестройка производства на использование СВС-технологий. Процесс, который еще сравнительно недавно казался экзотическим, сегодня превращается в реальную область научно-технического прогресса.

### **2.3.2. СВС-литье и его практическая реализация для получения изделий машиностроения**

СВС представляет собой не только совершенно новую область науки и техники, но и способствует появлению совершенно новых промышленных производств, технологических направлений. Одним из таких перспективных направлений является **СВС-литье**.

Под СВС-литьем понимается разновидность СВС-металлургии, при которой осуществляется литье расплавленного продукта горения в литейные формы.

Наиболее перспективным в настоящее время является центробежное СВС-литье – разновидность СВС-металлургии, при которой происходит сжигание высококалорийной экзотермической шихты при одновременном воздействии центробежного ускорения с целью более полного разделения основного и побочного продуктов и формования изделий, в том числе трубчатых.

Данная совершенно «молодая» технология, едва возникнув, уже достаточно широко применяется в промышленности многих стран.

Так, российскими учеными разработан метод центробежного СВС-литья двухслойных труб, в России создано 15 производственных центров СВС-литья. В год выпускается свыше 2000 т СВС-продуктов.

Японские ученые создали технологию центробежного СВС-литья труб большого диаметра, позволяющую наносить на внутренние поверхности стальных труб покрытия из корундовой (алюмооксидной) керамики. На основе данных разработок в Китае освоено и организовано многотоннажное производство труб с износостойким внутренним покрытием для перекачки абразивных сред: минерального сырья, цемента, угля. В эту деятельность вовлечены 10 заводов, а объем производства составил свыше 10 тыс. тонн.

Другие реальные перспективные области применения СВС-литья – изготовление литейной оснастки, элементов оборудования цветной металлургии и др.

### **2.3.3. Использование самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в технологии литья по газифицируемым моделям**

Перспективным направлением практического использования СВС в литейном производстве является применение процессов твердого горения в одном из наиболее прогрессивных методов точного литья – литье по газифицируемым моделям (см. п. 2.2.2).

Аспекты применения СВС в данном методе различны и многоплановы. Рассмотрим некоторые из них.

Как указывалось в п. 2.2.2, литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) предполагает разложение пенополистирольной модели потоками жидкого металла, заливаемого в форму. При этом образуются повышенные объемы вредных газов и парогазовых смесей – изопентана, бензола, толуола, этилбензола, стирола, а также  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ . Кроме того, образующиеся газы взаимодействуют с металлом в процессе заполнения формы, ухудшая его физико-механические свойства. Имеет место также интенсивная конденсация паровой фазы продуктов разложения модели вблизи границы металл-форма и в достаточно большом слое формы, прилегающем к отливке, что вызывает необходимость регенерации кварцевого формовочного песка и приводит к необходимости менять сыпучий наполнитель примерно через 15 заливок.



Данных отрицательных эффектов при разложении пенополистирольной модели можно избежать, применяя оригинальную конструкцию литейной формы с использованием СВС-материалов.

Дело в том, что особенностью получаемых СВС-материалов является пористая структура, высокая однородность структуры и свойств и их хорошая воспроизводимость. Способы регулирования общей пористости и размеров пор просты и позволяют варьировать эти размеры в пределах: общую пористость – от 20 до 70 %, размеры пор – от 15 мкм до 2 мм.

Структура пор пористых проницаемых СВС-материалов такова, что получаемые изделия имеют значительно меньшие аэро- и гидродинамические сопротивления потокам, чем изделия такой же пористости, изготовленные методами традиционной порошковой металлургии.

Благодаря наличию пористости СВС-материалы можно применять в качестве специальных элементов-вставок литейной формы, рис. 2.1, и тем самым использовать их для очистки, улавливания и накопления продуктов деструкции, образующихся при разложении пенополистирольной модели в ЛГМ.

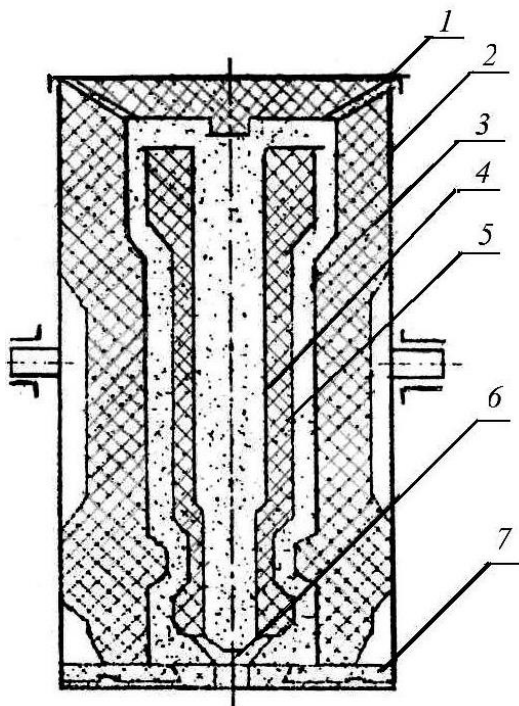


Рисунок 2.1 – Литейная форма с СВС-элементом для ЛГМ

Форма содержит крышку 1, контейнер 2, вставку 3 из СВС-материала, сыпучий наполнитель 4, пенополистирольную модель 5, питатель 6, днище 7. Металл, поступающий в форму через питатель 6, воздействует на пе-

нополистирольную модель 5 тепловым потоком, что приводит к ее деструкции и выделению большого количества парогазовой смеси. Конденсируясь, парогазовая смесь накапливается в сыпучем наполнителе (песке) и, вторично испаряясь при прогреве песка на определенную толщину, конденсируется в элементе из СВС-материала.

Использование СВС-материала в качестве фильтрующего элемента литейной формы позволяет снизить выбросы в атмосферу парогазовой фазы продуктов деструкции модели (изопентана, бензола, толуола, этилбензола, стирола) на 85...95 %, газовой фазы ( $N_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ) – на 70 %, что существенно улучшает экологические показатели данной технологии литья. Кроме того, уже в процессе получения отливки происходит регенерация сыпучего наполнителя и тем самым повышается срок эксплуатации литейной формы, сокращается расход сухого наполнителя. Благодаря многократному использованию формовочного материала сокращаются энергозатраты и, в итоге, снижается себестоимость отливок.

Другой важной сферой применения СВС-материалов в литье по газифицируемым моделям являются устройства вентиляции форм, которые представляют собой необходимый элемент литейной оснастки для выхода воздуха и газов в процессе заливки металла, а также устройства вентиляции пресс-форм для получения самих пенополистирольных моделей.

В технологии ЛГМ используются не только материалы, полученные по технологии СВС, но и возможна реализация процесса СВС непосредственно в процессе литья. Например, разработан способ получения композиционных чугунных отливок с применением пенополистирольных моделей со вставками из легирующей композиции. Фактически данная технология является развитием ЛВМ по газифицируемым моделям с имплантатами, см. п. 2.2.2.

В данной технологии в пенополистирольную модель клеивают вставки из композиций, содержащих легирующий состав (2...4 % порошкообразного магния, 3...4 % графита, 2...3 % феррохрома, 1,5...2 % полистирола, остальное – ферротитан).

При заполнении формы жидким металлом – чугуном в зоне расположения вставок происходит СВС-реакция – процесс образования карбида титана ( $Ti + C \rightarrow TiC$ ), сопровождающийся выделением большого количе-

ства тепла ( $\sim 230$  кДж/моль), что приводит к резкому разогреву металла в зоне вставки до  $1600...1650$  °С и формированию в этой зоне металлокерамического слоя на основе высокотвердого и износостойкого карбида титана. В процессе расплавления металла вставок и протекания СВС-реакции происходит также частичный массо- и теплообмен с прилегающими слоями жидкого чугуна. Поэтому после завершения процессов кристаллизации отливка приобретает композиционный (макрогетерогенный) характер со значительным различием в химическом составе, структуре и свойствах металла в разных зонах отливки при сравнительно плавном переходе от одной зоны к другой.

Основой легирующей композиции вставок служит ферротитан, содержащий  $65...68$  % Ti, в связи с его сравнительно низкой температурой плавления ( $1080...1100$  °С), что обеспечивает его гарантированный перевод в жидкое состояние при температуре заливаемого в форму жидкого чугуна и значительно облегчает протекание СВС-реакции.

В качестве второго основного компонента вставки служит графит в количестве, обеспечивающем (совместно с углеродом других составляющих вставки, жидкого чугуна и газовой атмосферы литейной формы) протекание СВС-реакции.

Феррохром вводится с целью предотвращения графитообразования в зоне СВС-вставки и обеспечения достаточного количества карбидов в переходном слое.

Магний играет роль модификатора расплава в поверхностной и переходной зонах. Переходя в парообразное состояние, он активно рафинирует расплав и, перемещаясь на значительные расстояния вглубь отливки, обеспечивает формирование переходной зоны со структурой высокопрочного чугуна с шаровидным и (или) вермикулярным графитом.

Применение данного способа позволяет формировать композиционные чугунные мелкие и средние отливки с износостойким поверхностным слоем, отличающиеся стабильностью структуры и свойств.

## **2.4. Технологии ускоренного прототипирования (*Rapid Prototyping*) в современном литейном производстве**

### **2.4.1. Сущность процессов ускоренного прототипирования**

Современное производство характеризуется многообразием выпускаемых изделий при сокращении серийности их выпуска. Быструю смену поставляемых на рынок изделий, превосходящих по функциональным, эстетическим, экологическим свойствам предыдущие, нельзя обеспечить только за счет производительности. Необходимо применение новейших технологий, способных существенно сократить время разработки, освоения и производства нового изделия. Путь от идеи до готового изделия должен быть максимально коротким. Оперативно реагировать на рыночный спрос выпуском качественных изделий – значит обеспечить предприятию конкурентные преимущества и стабильный успех.

Одной из новейших технологий, которая удовлетворяет данным требованиям и которая стремительно начала развиваться и применяться ведущими фирмами мира (в США, Японии, Германии, Франции, Израиле, а также в Украине, России) с начала 90-х годов XX века и по праву признана технологией третьего тысячелетия, является *технология ускоренного прототипирования (Rapid Prototyping – RP)*. В настоящее время использование технологии ускоренного прототипирования является частью идеологии «сжатого» производства – *Time-Compression Engeneering*.

Основное отличие данной технологии от традиционных методов получения изделий состоит в том, что изделие создается не отделением «лишнего» материала от заготовки, а послойным наращиванием материала (генеративным методом) снизу вверх, включая входящие в изделие внутренние и даже подвижные части. Образ изделия задается аналитически, чертежом, файлами компьютерных томографов или цифровыми фотографиями. На этой основе создается трехмерная математическая модель конструкции объекта, которая оптимизируется, а затем послойным наращиванием разными способами материализуется, т.е. создается физический объект.

Развитие мощной вычислительной техники, способной оперировать трехмерными объектами, и успехи, достигнутые в разработке и освоении струйных, в том числе лазерных, технологий обработки материалов, явились основой бурного развития технологий послойного изготовления трехмерных объектов практически любой степени сложности.

Сегодня существует большое многообразие генеративных методов ускоренного формообразования изделий, отличающихся по физико-химической сути энергетического воздействия на исходный материал в процессе материализации виртуальной модели, исходным материалам, но

работающих по единому принципу – послойного построения физической модели.

Основными методами являются следующие:

▲ технология *SLA (Stereolithography)* – способ стереолитографии, основанный на избирательной (селективной) полимеризации (отверждении) поверхностного слоя жидкого фотополимера при воздействии на него ультрафиолетового излучения, например, лазера, или излучения видимой части спектра;

▲ технология *SLS (Selective Laser Sintering)* – избирательное спекание порошковой массы в результате теплового воздействия лазерного излучения;

▲ технология *LOM (Laminated Object Manufacturing)* – послойный синтез изделий из листовых материалов под воздействием сфокусированного лазерного луча, т.е. лазерная «резка» и «склеивание» листовых материалов;

▲ технология *FDM (Fused Deposition Modeling)* – послойная укладка расплавленной до полужидкого состояния нити (проволоки) в соответствии с геометрией математической модели (моделирование наплавлением);

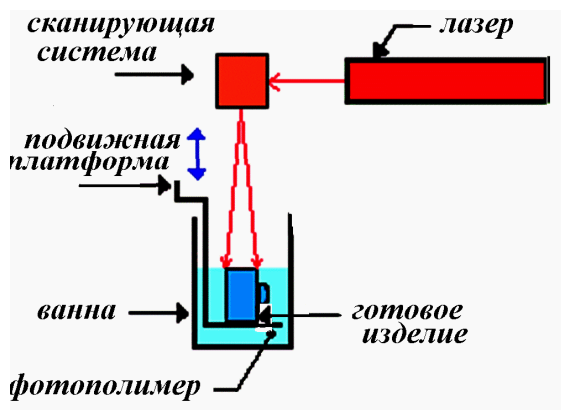
▲ технология *3D Printing* – послойный синтез методом трехкоординатной печати и многие другие.

Схемы наиболее распространенных процессов приведены на рис. 2.2; примеры получаемых изделий – на рис. 2.3.

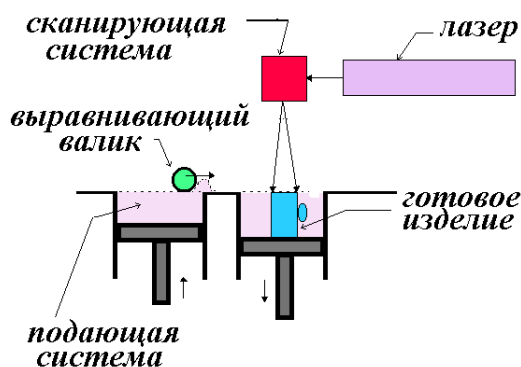
Процесс изготовления изделий методом стереолитографии, наиболее точного и распространенного процесса ускоренного прототипирования, протекает следующим образом, см. рис. 2.2, а. Фоточувствительный полимер (на основе фотополимерных смол-реактопластов), затвердевающий при воздействии излучения лазера, заливается в ванну. На толщину одного слоя (0,05...0,15 мм на машинах разного типа) ниже поверхности жидкого полимера располагается подвижная платформа, способная перемещаться в вертикальном направлении.

Луч лазера сканирует с помощью зеркала слой полимера над платформой, отверждая полимер по форме соответствующего поперечного сечения. Процесс начинается с нижнего поперечного сечения детали. Затем платформа опускается в ванну с полимером на толщину одного слоя, давая

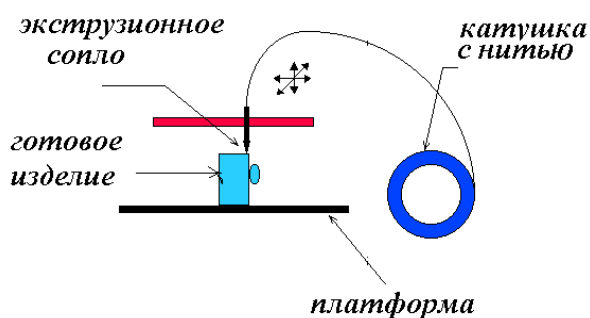
полимеру растечься по поверхности детали для начала нового слоя. И так повторяется до тех пор, пока не будет наращён верхний слой готовой детали. Для полного затвердевания детали выполняется окончательное отверждение.



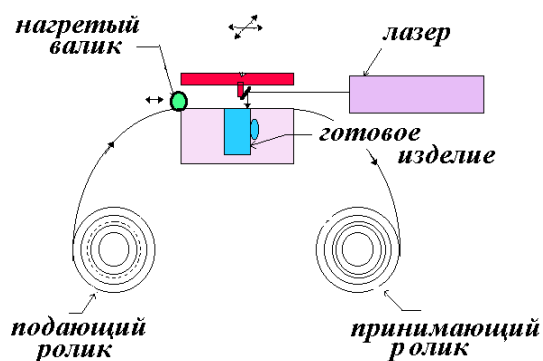
а



б



в



г

Рисунок 2.2 – Схемы получения трехмерной твердотельной модели послойным наращиванием:

- а – способ стереолитографии (SLA); б – процесс селективного лазерного спекания (SLS); в – моделирование методом наплавления (FDM); г – послойный синтез объектов из листовых материалов (LOM)

Процесс получения детали путем селективного лазерного спекания протекает следующим образом, см. рис. 2.2, б. Порошковый материал, используемый для получения изделия, поступает из подающей системы на подвижную платформу и выравнивается валиком. Слой порошка избирательно сканируется и нагревается лучом лазера в соответствии с конфигурацией первого сечения, что приводит к спеканию порошковой массы и фор-

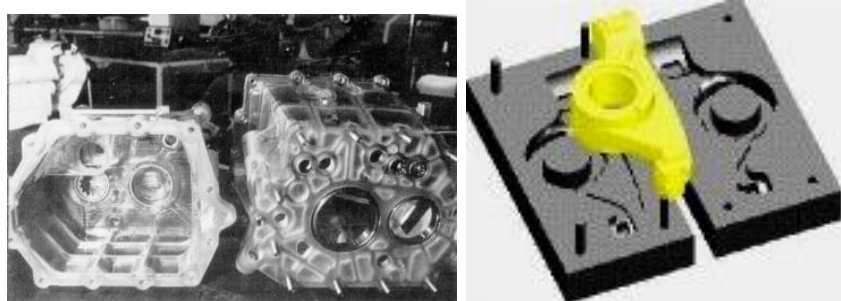
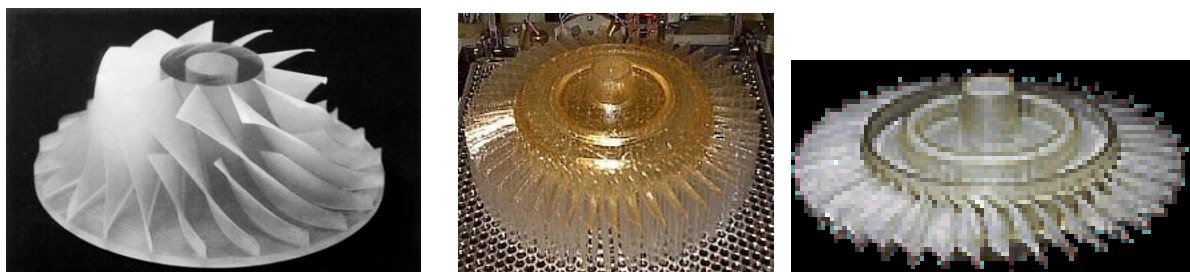
мированию первого слоя изделия, аналогично предыдущему способу, но с использованием теплового воздействия лазерного луча. Процесс начинается с нижнего поперечного сечения. Далее платформа опускается вниз на толщину одного слоя для нанесения нового слоя порошка (0,08...0,2 мм). Луч лазера сканирует новый слой порошка, соединяя его с предыдущим и формируя следующее поперечное сечение, до образования окончательного изделия, см. рис. 2.2, б. В качестве исходных материалов возможно использование полимерных сред (термопластов), восковых, металлических, композиционных порошковых сред.

В процессе моделирования наплавлением (*FDM*), см. рис. 2.2, в, каждый слой изделия формируется путем выдавливания материала (термопластичного полимера, воска) в виде нити, проволоки или волокна, намотанного на катушку, нагретого в *FDM*-экструзионном сопле до расплавленного состояния (температура выдавливаемого материала незначительно превышает температуру его затвердевания), на платформу носителя (процесс можно сравнить с созданием надписей на торте кремом). Изделие получают путем последовательного наплавления слоев ( $\sim 0,025 \dots 1,25$  мм).

В технологии *LOM*, см. рис. 2.2, г, деталь изготавливается путем ламинирования и лазерной резки материалов, поступающих в листовом виде (бумага с покрытием, пластмассы, стеклоткань, керамика, металл, композиционные материалы). Каждый лист приклеивается к заготовке с помощью нагрева и давления, образуя очередной слой. Листовой материал подается в виде непрерывного рулона с одной стороны машины и принимается с противоположной стороны, см. рис. 2.2, г. Температуру и давление, необходимые для ламинирования, обеспечивает нагретый валик. Когда к заготовке «приклеивается» очередной лист, платформа опускается на толщину одного слоя. После того, как лист приклеен, он сканируется лазером вдоль контуров текущего поперечного сечения.

Как и в предыдущих процессах, см. рис. 2.2, а, б, в, этот шаг начинается с нижнего поперечного сечения. Области, выходящие за пределы контуров, «штрихуются» лазером, т.е. разрезаются на маленькие кусочки, называемые черепичками (*tiles*), для последующего удаления, когда деталь будет закончена.

Главным достоинством данных технологий является резкое снижение затрат времени, высокое качество и почти полное отсутствие ограничений по сложности конструкции изделия, сокращение стадии технологической подготовки производства и, таким образом, сбережение материальных, энергетических и трудовых ресурсов.



*a*

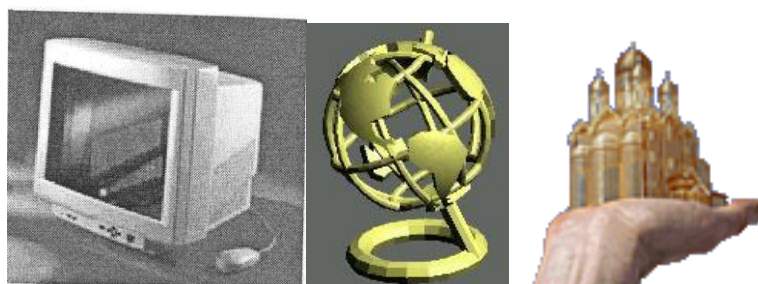




Рисунок 2.3 – Примеры изделий (моделей, прототипов, функциональных деталей), полученных с помощью технологий ускоренного прототипирования:

*а* – промышленного назначения;

*б* – бытового назначения

Сегодня многие промышленно развитые страны ориентированы на применение *RP*-технологий, число установок *RP* насчитывается десятками тысяч и быстро растет.

*Системы компактного интеллектуального производства (КИПр)*, сочетающие высокие технологии автоматизированного проектирования и технологии ускоренного прототипирования с современными производственными и управленческими технологиями, действуют сегодня практически на всех ведущих фирмах мира, производящих сложные высокотехнологичные изделия в автомобильной, авиационной, радиоэлектронной, медицинской, промышленности, таких как *Ford, Craisler, Renault, Matra, Jeneral Motors, Toyota, Mitsubishy, Boeing, Caterpillar* и др.

Ведущие автомобильные компании, применяя *RP*-технологии на этапе разработки и технической подготовки производства, сократили, в целом, сроки постановки на производство и выпуск новых моделей автомобилей с 3...5 до 1,5...2 лет.

Наиболее динамично новое направление развивается в области создания прототипов. Прототип – это первый опытный и почти всегда единственный (и в этом смысле уникальный и дорогостоящий) экземпляр изделия. Модели-прототипы требуются различным службам предприятия:

- *дизайнеры и конструкторы* могут легко оценивать варианты внешнего вида, эргономику разрабатываемых изделий, проверять собираемость и функциональность конструкции, внося необходимые изменения еще до запуска изделий в производство;

- *маркетинговые и рекламные службы* могут эффективно проводить исследования рынков сбыта, демонстрируя заказчикам и потребителям образцы разрабатываемого изделия, а также использовать их в рекламных целях;

- *технологи* могут использовать их в качестве мастер-моделей для изготовления традиционной технологической оснастки (например, литевой), а также в технологиях быстрого изготовления опытных партий

(например, при использовании силиконовых форм или методов напыления металлов);

– *патентное бюро* получает преимущество во времени при оформлении патентов на новые разработки и т.д.

Для изготовления традиционными методами опытных образцов таких деталей, как блок цилиндров или головка цилиндров двигателя требуется 8...10 месяцев (литье + механообработка), а с использованием технологий *RP*, т.е. «выращиванием» модели в специальных установках, реализующих принцип послойного синтеза, без специальной технологической литейной оснастки, этот срок сокращается до 1...1,5 месяцев.

Получаемые с помощью технологий послойного наращивания прототипы используются в самых различных областях – от тяжелого машиностроения, авиационной техники, приборостроения до медицины, судебной экспертизы, антропологии, археологии.

Использование *RP*-технологий сокращает период от разработки изделия до постановки его на производство в несколько раз, что дает преимущество в конкурентной борьбе, несмотря на относительно высокую стоимость специализированного оборудования.

Применение технологий ускоренного прототипирования сегодня далеко не исчерпывается изготовлением прототипов и выходит за рамки термина «прототипирование».

Например, *RP*-технологии достаточно широко применяются для производства малых серий товарной продукции.

Достаточно важной областью применения *RP*-технологий является производство моделей и оснастки для различных производственных процессов, например, литья.

Сочетание *Rapid Prototyping* с литейными технологиями особенно актуально, так как литейные процессы как процессы прямого формообразования, наиболее близки к оптимальным, поскольку сокращают путь к получению готовых изделий.

Многие материалы, применяемые в качестве исходных в технологиях *RP*, могут также использоваться в литейных технологиях, либо в качестве модельных, либо для изготовления оснастки или ее элементов. В то же время литейные технологии, в отличие от других переделов машиностроения, отстают в области информатизации (на одного работающего в отечественных литейных цехах приходится в 2...2,5 раза меньше ЭВМ, других электронных устройств и компьютерных программ, чем в механических

или сборочных цехах). Поэтому применение наукоемких *RP*-технологий может существенно поднять уровень развития литья.

Сочетание технологий послойного синтеза объектов с традиционными технологиями литья наиболее перспективно в автомобилестроении, так как многие детали автомобиля, в том числе корпусные (блоки и головки цилиндров, мосты, картеры сцепления и коробки передач и т.д.) являются наиболее трудоемкими в изготовлении. Для их производства традиционным методом – с помощью литья в песчано-глинистые формы с использованием деревянных моделей – используется весьма квалифицированный персонал литейщиков, формовщиков. Трудоемкость, высокая стоимость и низкая скорость создания опытных литейных деталей – основные факторы, сдерживающие развитие опытно-конструкторских работ в отечественном автостроении.

Рассмотрим некоторые примеры применения *RP*-технологии в литейном производстве.

#### **2.4.2. Изготовление литейной оснастки с помощью технологий ускоренного прототипирования**

Одним из важнейших направлений сочетания технологий ускоренного прототипирования и литья является изготовление литейных моделей, которые используют в качестве выжигаемых (газифицируемых) или в качестве постоянных моделей при литье в песчано-глинистые формы.

Метод литья по выплавляемым и выжигаемым (газифицируемым) моделям в настоящее время считается одной из лучших технологий для изготовления деталей сложной конфигурации с узким полем допуска (*net-shape*-технология) и рассматривается в качестве одного из наиболее прогрессивных способов изготовления отливок в III тысячелетии; относится к высокотехнологичным промышленным способам получения готовых деталей или заготовок, максимально приближенных к деталям, см. п. 2.2.2.

Традиционно, как указывалось в п. 2.2.2, для литья по выплавляемым или выжигаемым моделям используют модели из воскообразной модельной массы, изготовленные путем запрессовки под давлением модельного состава в металлическую пресс-форму, либо пенополистирольные модели.

Один из существенных недостатков использования данной технологии для небольших партий изделий – длительность процесса, а также высокая стоимость оснастки для производства моделей. В качестве альтернативы моделей из воскообразной или пенополистирольной модельной массы можно использовать полимерные модели, изготовленные с помощью технологий ускоренного прототипирования, что дает значительную экономию времени и средств, так как исключает оснастку, необходимую для изготовления моделей.

Для получения выжигаемых моделей достаточно широко уже используются технологии *SLA*, *SLS*, *FDM*, см. рис. 2.2. Причем на основе указанных процессов разработаны комплексные технологии, включающие не только этап получения выжигаемой модели, но и весь производственный цикл, включая производство рельных металлических отливок из разнообразных литейных металлов и сплавов.

Примером такой технологии может служить технология литья по выжигаемым стереолитографическим моделям, которая получила название *Quick Cast* («быстрое литье»), патент США, фирма *3D Systems*. Данная технология включает стадии изготовления модели на стереолитографической установке по данным математической модели послойным отверждением жидкого фотополимера лучом лазера, формирование на поверхности модели огнеупорной керамической формы-оболочки, выжигание из нее модели и заливку формы жидким металлом.

Как правило, модель получают пустотелой, «квазиполой» (17 % отвержденного фотополимера, 83% воздуха) с целью экономии дорогого фотополимера, уменьшения массы модели, а также сокращения времени выращивания. Структура модели представляет собой монолитный сплошной поверхностный слой с малой шероховатостью; внутренний объем имеет решетчатое (сотовое) строение с множеством связанных перегородок, играющих роль ребер жесткости. Дополнительным преимуществом подобного стиля построения модели является уменьшение внутренних напряжений материала модели, что, в свою очередь, обеспечивает высокую точность и стабильность размеров. В результате использования пустотелых моделей также уменьшается коксовый остаток и количество продуктов термодеструкции при выжигании моделей.

Стереолитографическая модель, выполняемая из фотополимерной композиции (композиции на основе реактопластов – эпоксидных смол),

отличается более высокой точностью и стабильностью размеров, высоким качеством поверхности (шероховатость поверхности  $Ra = 2$  мкм), неограниченными ресурсами по степени сложности по сравнению с традиционной воскообразной и не требует специальной оснастки. Временные затраты на производство металлических отливок по технологии *Quick Cast* существенно меньше (1...4 недели) по сравнению с традиционной технологией (18...20 недель).

Данная технология уже используется многими зарубежными и отечественными фирмами.

Литейные выжигаемые модели получают также с помощью технологии селективного лазерного спекания – *SLS*, см. рис. 2.2, б. При этом используются порошковые составы – как полимерные (на основе термопластов – полистирола, полиамида), так и металл-полимерные (никель + полиамид, бронза + поликарбонат). Для придания полистирольным, используемым далее в качестве выжигаемых, моделям большей прочности их пропитывают (инфильтруют) расплавленным парафином, после чего модель готова для заливки формовочной смесью и последующих технологических операций. Полиамидные модели используют чаще в качестве функциональных.

Для получения выжигаемых моделей (в частности, для замены моделей из восковой массы в литье по выплавляемым моделям небольших партий изделий) используется достаточно широко также технология моделирования методом наплавления – *FDM*, см. рис. 2.2. в, отличающаяся удобством в эксплуатации, простотой и дешевизной обслуживания, экологической безопасностью.

В качестве модельного материала в данном случае чаще всего используется термопластичный полимер *ABS*-пластик (сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола) – высокопрочный, износостойкий материал с достаточной высокой термостойкостью (до 93 °С), влагостойкостью, жесткостью, практически не дающий усадки, обеспечивая таким образом высокую точность моделей и возможность работы с моделями, не опасаясь повреждений (в т.ч. при сборке моделей в блок).

При изготовлении модельного блока к *ABS* - прототипу отливки присоединяют стандартные стояк, прибыли, выпоры из модельной массы, после чего полученную сборку покрывают слоями керамики, как при обычном производстве литья по выплавляемым моделям. Затем оболочку по-

мещают в печь для обжига, где модель выжигается, оставляя в полой оболочке небольшое количество легко удаляемой (промывкой или сжатым воздухом) золы.

Примеры деталей, полученных с помощью литья по выжигаемым моделям, «выращенным» по *RP*-технологиям, приведены на рис. 2.4.

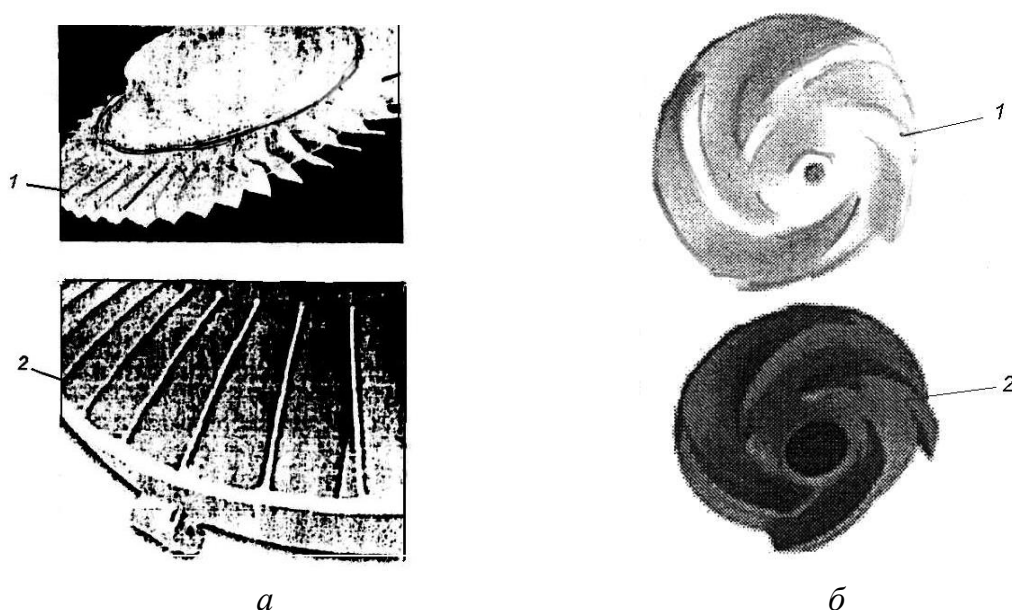


Рисунок 2.4 – Примеры изделий, полученных сочетанием *RP* – технологий и технологий литья:

*а* – колесо турбины, полученное с применением *SLA*-технологии:

1 – фотополимерная модель; 2 – фрагмент отливки колеса из спецстали;

*б* – крыльчатка, полученная с применением *FDM*-технологии:

1 – *ABS*-модель; 2 – отливка из нержавеющей стали

Коэффициент теплового расширения моделей из *ABS*-пластика составляет  $\sim 0,24$  %; зольность *ABS*-модели составляет 0,02%, что соответствует лучшим по этому показателю традиционным модельным составам и позволяет реализовать «чистое» выжигание.

Кроме *ABS* -пластика, используют также его модификацию *ABSi*, отличающуюся более высокой ударной вязкостью и химической стойкостью; поликарбонат, полифенилсульфон, литьевой воск и др. материалы.

Модели, полученные послойным синтезом (технологиями *SLA*, *SLS*, *FDM*), могут быть использованы также в технологии точного вакуумного литья по выжигаемым моделям, особенностями которого является реализация основных операций – заливки формовочной смесью (жидкой кера-

микой, гипсокерамикой), заливки металла и получения готовой отливки – в условиях вакуума, что способствует дегазации формовочной смеси, повышению прочности формы, обеспечению высокого качества отливок.

Уже получены экспериментальные и практические результаты по использованию моделей, полученных указанными выше технологиями ускоренного прототипирования, в качестве выжигаемых для получения отливок разной степени сложности из различных сплавов, в том числе деталей авиационных двигателей, корпусных деталей приборов автомобиля и т.д.

Технологии *Rapid Prototyping* также применяются для изготовления постоянных моделей в технологии литья в песчано-глинистые формы, которая, благодаря относительной простоте, универсальности, а главное, дешевизне, по-прежнему лидирует в машиностроении.

В качестве моделей для технологии литья в песчано-глинистые формы используются, например, модели из ABS-пластика, полученные на установках *FDM*. Стойкость подобных моделей – 50...150 съёмов.

Преимуществами применения *RP*-моделей в литье в песчано-глинистые формы является практическое отсутствие ограничений по сложности модели, повышение точности моделей, уменьшение припусков на последующую механообработку, что позволяет снизить металлоемкость заготовки и трудоемкость ее последующей обработки. Кроме того, полимерные модели имеют прочность, приблизительно в 40 раз большую, чем модели, изготовленные из древесины; в отличие от древесины, не подвержены расслаиванию.

«Выращивание» моделей открывает большие возможности в технологии литья металлов, позволяет реализовать конструкции, ранее недоступные вследствие технологических ограничений.

*RP*-технологии могут применяться не только для изготовления литейных моделей.

Например, в учебно-научно-производственном центре при НТУ «ХПИ» на базе процесса стереолитографии разработана оригинальная литейная оснастка – модельный модуль, рис. 2.5, включающий в себя сразу две основные составляющие оснастки для литья в песчано-глинистые разовые формы – модель с подмодельной плитой и стержневой ящик. Наличие дополнительных элементов 1, 2, 3, 4, см. рис. 2.5, позволяет формировать плоскости разреза различной степени сложности.

Разработанная технология литья в песчано-глинистые формы на основе модельных модулей, полученных стереолитографией, позволяет на 30...40 % повысить точность отливок, в 4...5 раз снизить шероховатость поверхности, значительно сократить объем механической обработки, обеспечить экономию жидкого металла (выход годного до 95 %), достичь достаточной плотности отливок, получить другие преимущества.

Применение модельного модуля на производстве позволяет получать качественные отливки при быстрой ориентации на рынок спроса продукции.

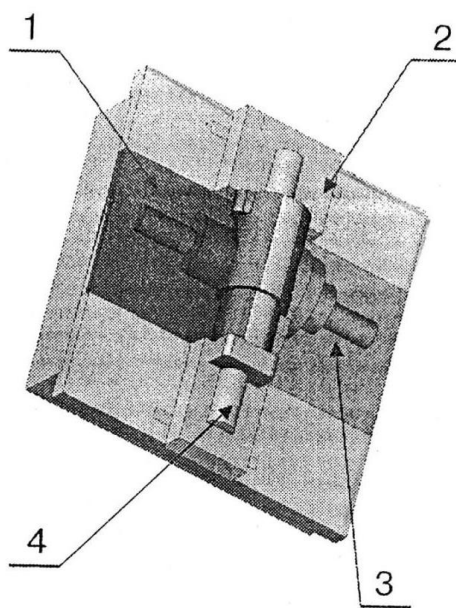


Рисунок 2.5 – Модельный модуль

Важным направлением использования стереолитографии является также литье в эластичные силиконовые формы – метод, который используется для получения опытных образцов и небольших партий пластмассовых и восковых изделий (в т.ч. восковых моделей для технологии литья по выплавляемым моделям) любой сложности и габаритов без традиционной стандартной оснастки.

Получение силиконовых форм основано на точном копировании стереолитографической полимерной модели формовочным материалом – силиконом.

Силикон является кремнийорганическим полимером и отличается высокой термостойкостью (до 150 °С, некоторые виды – до 380 °С), совместимостью с большинством материалов, применяемых для изготовления моделей (пластиками, гипсовыми композициями, а также древесиной), хо-



рошей воспроизводимостью мелких деталей моделей, высокими диэлектрическими характеристиками.

При получении формы емкость (опоку) с подвешенной стереолитографической мастер-моделью заливают жидким силиконом. В камере, где находится опока, создается вакуум для удаления пузырьков воздуха из силиконовой смеси. Далее силиконовые формовочные материалы полимеризуются (т.е. затвердевают, вулканизируются) либо при комнатной температуре, либо с нагревом для ускорения процесса (до  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Модель извлекается путем разрезания силиконовой формы.

При использовании разделительного покрытия силиконовые формы выдерживают химическое воздействие, вызываемое полиуретанами, в такие формы могут заливаться также полиэфирные и эпоксидные смолы. В силиконовых формах могут также быть получены «восковки» для последующего изготовления отливок по выплавляемым моделям.

Силиконовые формы, полученные по стереолитографической модели, могут также использоваться в технологии центробежного литья пластмасс или легкоплавких металлов. При этом возможно получение отливок достаточно высокой сложности. Литейная форма может использоваться для получения 20...50 отливок.

Наряду с силиконовыми, технология *SLA* используется также для получения эпоксидных форм, которые имеют достаточно широкую номенклатуру применения: для получения пресс-форм для литья под давлением, формовочных моделей и стержневых ящиков, восковых моделей для литья по выплавляемым моделям, штампов для обработки давлением листовых материалов и т.д.

Технологии *RP* также используются в перспективной технологии литья в гипсовые формы для изготовления алюминиевых отливок высокой степени сложности и с высокими требованиями к качеству поверхности.

Литейная оснастка либо ее формообразующие части могут быть также получены с помощью технологий ускоренного прототипирования (например, *SLS*) при использовании керамических материалов. Подобная оснастка применяется для литья пластмассовых деталей, металлических, а также для листовой штамповки металлов.

Для получения реальной объемной литейной оснастки либо металлических вставок для литейной оснастки используется метод селективного лазерного спекания (*SLS*). Причем оснастка, полученная с помощью дан-

ной технологии, может иметь работоспособность до десятков тысяч циклов и таким образом представляет альтернативу традиционным методам производства литейной оснастки (например, литейных форм) при обеспечении тех преимуществ генеративных методов формообразования, о которых говорилось выше.

Особое внимание уделяется составу исходной порошковой смеси, так как перспективность и экономичность технологии *SLS* по сравнению с другими технологиями послойного синтеза, в первую очередь, связана с возможностью применения широкой гаммы относительно дешевых и доступных порошковых сред.

Наиболее перспективными являются металлические порошковые составы: на основе стали (углеродистой или легированной, например, коррозионностойкой), в том числе с полимерным связующим, подвергаемые инфильтрации бронзой для уменьшения пористости; металл-полимерные композиты (например, механические смеси металлических порошков на основе никеля или бронзы с полимерным связующим – полиамидом или поликарбонатом); биметаллические составы (например, медь-олово, никель-олово), в которых реализуется жидкофазное спекание; составы на основе интерметаллидов, в которых при воздействии лазерного излучения реализуются такие эффективные процессы, как лазерная пайка или самораспространяющийся высокотемпературный синтез (см. п. 2.3), например, составы на основе порошков никеля и титана, применяемые в медицине.

Литейная оснастка, полученная с помощью *SLS*-технологии, не уступает по технико-экономическим параметрам традиционной и применяется в основном в технологии точного литья под давлением.

Одним из примеров такого применения является изготовление вкладышей пресс-форм, в том числе с охлаждательными каналами любой конфигурации. Применение подобной оснастки при литье алюминиевых сплавов дает возможность использовать ее для 300 и более запрессовок, обеспечивает высокое качество и точность отливок сложной формы. Подобная оснастка может быть рекомендована для серийного производства.

### **2.4.3. Создание «интеллектуальной» оснастки**

Одним из существенных недостатков существующих способов ускоренного прототипирования, сдерживающим их широкое применение, явля-

ется невозможность, как правило, получить детали, полностью идентичные деталям серийного производства. Это связано с тем, что прототип должен быть изготовлен не только из одного и того же материала, что и серийная отливка, но и иметь идентичные с ней свойства (качество поверхности, прочность и структуру), чтобы выдержать соответствующие нагрузки. Эти свойства в значительной степени определяются тепловым режимом получения изделий, в частности, равномерностью охлаждения отливки.

Одним из способов решения данной проблемы является так называемая «интеллектуальная» оснастка, рис. 2.6, – оснастка с расположенными вблизи поверхности формы специальными («темперированными») каналами, которые позволяют изменять скорость охлаждения расплава в форме направленным управлением ее охлаждения или нагрева, и таким образом, влиять на свойства изготавливаемых изделий.

Традиционные технологии (сверление, фрезерование, электроэрозионная обработка) не дают возможности изготовить такие каналы, обычно сложной формы, в теле оснастки. Получение подобных каналов с помощью технологий ускоренного прототипирования (*SLS, LOM, DMD*) реализуется достаточно просто, см. рис. 2.6.

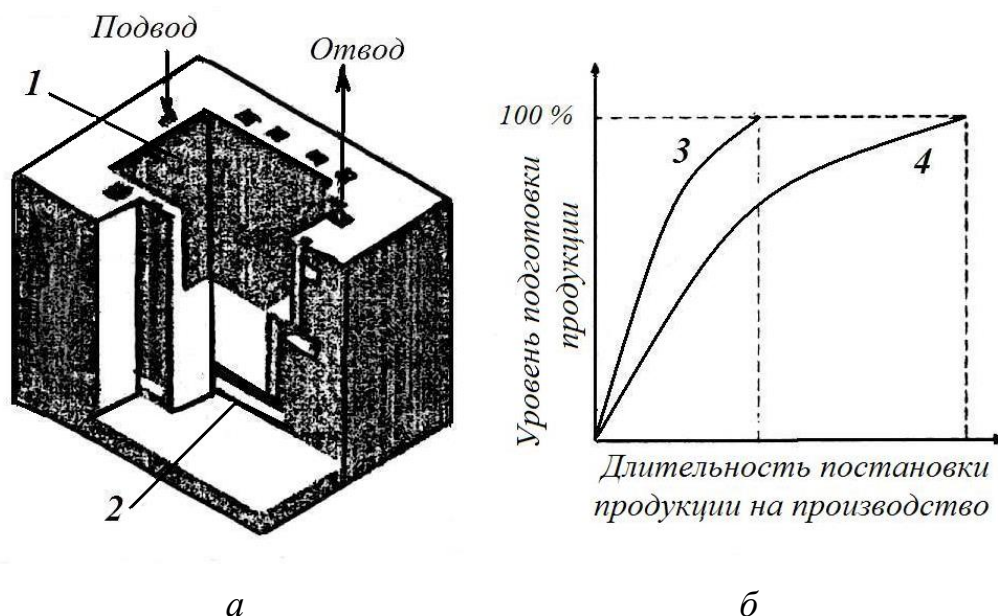


Рисунок 2.6 – Схема конструкции «интеллектуальной» оснастки (а) и возможное сокращение длительности освоения продукции (б):

1 – полость формы; 2 – темперированный канал;  
3, 4 – новый и традиционный процессы соответственно

Тепловой режим оснастки в данном случае может быть отрегулирован таким образом, чтобы скорость охлаждения отливки соответствовала скорости ее охлаждения при серийном производстве, в результате чего становится возможным изготовление серии прототипов.

Получаемая оснастка позволяет оптимизировать качество деталей с помощью направленного затвердевания отливок и, таким образом, осуществлять изготовление деталей с оптимальными прочностными свойствами.

Кроме того, изменение скорости охлаждения отливок позволяет сократить цикл изготовления отливок с соответствующим повышением производительности.

Таким образом, освоение «интеллектуальной» оснастки с управляемым тепловым режимом формы позволяет уже при изготовлении прототипа получить необходимые сведения о процессе и качестве деталей, что способствует сокращению времени и расходов при организации их серийного производства, см. рис. 2.6, б. Этим открываются новые перспективы в области изготовления прототипов и малых серий отливок.

Совершенные системы охлаждения при создании «интеллектуальной» оснастки реализованы с помощью технологии прямого осаждения металла *DMD*. С помощью данной технологии получают охлаждающие каналы в металлических формах для литья, «оборачивающиеся» вокруг детали, а также теплоотводы с высокой проводимостью, что позволяет сократить цикл заливки и охлаждения, добиться равномерности температуры и значительно улучшить качество деталей. Кроме того, разработана технология «холодных форм» («*Cool Mould*»), в которой в формах из инструментальной стали формируются медные теплоотводы.

Практически идея «интеллектуальной» оснастки реализована для технологий литья в кокиль и под давлением.

## **2.5. Управление формированием структуры отливок**

Свойства металлических материалов – механические, технологические, эксплуатационные – в значительной мере определяются зеренной структурой (формой и размерами кристаллитов, их взаимной ориентацией), формирующейся на стадии кристаллизации в процессе выплавки ме-

талла, а также непосредственно в процессах литья. Управление структурой позволяет создавать материалы с требуемым комплексом свойств.

Рассмотрим некоторые из методов литья, позволяющие формировать заданную структуру и, соответственно, свойства отливок.

### 2.5.1. Получение отливок методом направленной кристаллизации

Как известно, типичная структура слитка, рис. 2.7, состоит из трех основных зон: 1) зоны мелких равноосных кристаллов, образующихся при быстром охлаждении металла, соприкасающегося со стенкой формы; 2) зоны столбчатых кристаллов, состоящей из почти параллельных узких кристаллов, вытянутых вдоль направления теплоотвода; 3) зоны равноосных кристаллов больших размеров.

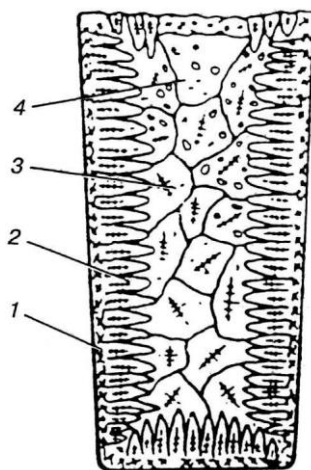


Рисунок 2.7 – Строение металлического слитка:

1 – внешняя мелкокристаллическая зона; 2 – зона столбчатых кристаллов;  
3 – зона равноосных крупных кристаллов; 4 – усадочная раковина

В зависимости от состава сплава, размеров слитка, условий охлаждения рассмотренные зоны могут изменяться и даже исчезать, что имеет большое практическое значение.

Например, при определенных условиях зона столбчатых кристаллов может увеличиться и занять все сечение слитка, вплоть до центральной части. Зона таких кристаллов имеет большую плотность, т.к. в ней мало газовых пузырей, раковин. В то же время на участках стыка столбчатых кристаллов металл имеет пониженную прочность, и при обработке давлением (прокатке, ковке) на этих участках могут возникнуть трещины. Поэтому для малопластичных металлов, в том числе и для стали, развитие зоны столбчатых кристаллов в принципе нежелательно. В пластичных металлах

(меди, никеле и их сплавах) для получения более плотного слитка расширение зоны столбчатых кристаллов по всему объему кристалла является благоприятным и способствует повышению определенных механических свойств.

Создание столбчатой (или монокристаллической) структуры особенно актуально для жаропрочных никелевых сплавов, работающих в условиях высоких температур (до 1000 °С и выше) и напряжений. Помимо основного назначения – изготовления лопаток и других ответственных деталей современных газотурбинных двигателей, эти сплавы применяют также для производства штампов и матриц горячего деформирования металлов.

При высоких температурах (~ 1300 °С) деформационные процессы в сплавах в большей степени реализуются по границам зерен посредством межзеренного скольжения и диффузионной ползучести, а разрушение имеет межкристаллитный характер.

Поэтому устранение (или значительное уменьшение протяженности) поперечных границ зерен, являющихся очагами зарождения трещин, за счет образования столбчатой или монокристаллической структуры делает возможным одновременное повышение длительной прочности, пластичности и сопротивления теплосменам высокотемпературных жаропрочных сплавов, например, на основе никеля.

В табл. 2.1 приведены значения некоторых из указанных выше свойств жаропрочного никелевого сплава ЖС6У для отливок с равноосной, столбчатой и монокристаллической структурой.

Таблица 2.1 – Механические свойства жаропрочного сплава ЖС6У для отливок с различной структурой

Структура отливок	Т, °С	Кратковременные испытания			Длительные испытания	
		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	$\sigma_{40}^{975}$ , МПа	$\delta$ , %
Равноосная	20	850...950	3...5	4...6	230	3...5
	900	700...750	2...4	3...5		
Столбчатая	20	800...900	4...6	5...7	250	5...10
	900	700...750	3...5	4...6		
Моно-	20	900...1000	5...9	6...10	265	6...10

кристаллическая	900	850...900	14...16	15...18		
-----------------	-----	-----------	---------	---------	--	--

Из табл. 2.1 следует, что отливки со столбчатой структурой имеют более высокие значения прочности и пластичности при длительных испытаниях по сравнению с отливками с равноосной структурой; монокристаллические отливки характеризуются более высокими значениями длительной прочности по сравнению с отливками, полученными из того же жаропрочного сплава с равноосной и столбчатой структурой.

Одним из методов формирования отливок со столбчатой или монокристаллической структурой является *процесс направленной кристаллизации*, заключающийся в создании максимального градиента температуры в заданном направлении роста зерна при охлаждении отливок и минимального – в других направлениях.

Схема одной из перспективных установок для ускоренной направленной кристаллизации представлена на рис. 2.8. По данной схеме интенсивный направленный теплоотвод от формы с отливкой осуществляется посредством их конвективного охлаждения в ванне с расплавленным металлом, имеющим невысокую температуру плавления, например, оловом, алюминием.

Установка работает следующим образом. Внутри нагревательной печи 3 размещается керамическая форма 1, закрепленная на штоке 2 вертикального привода. Керамическую форму заполняют расплавом через заливочную воронку. Для обеспечения температурного градиента между зонами нагрева и охлаждения они разделены тепловыми экранами. Зона охлаждения, расположенная под зоной нагрева, состоит из тигля 4, заполненного жидким металлом 5, расплавление которого осуществляется нагревателем 6. После заполнения керамической формы расплавом она с помощью штока перемещается с определенной скоростью в зону охлаждения и постепенно погружается в жидкометаллический охладитель.

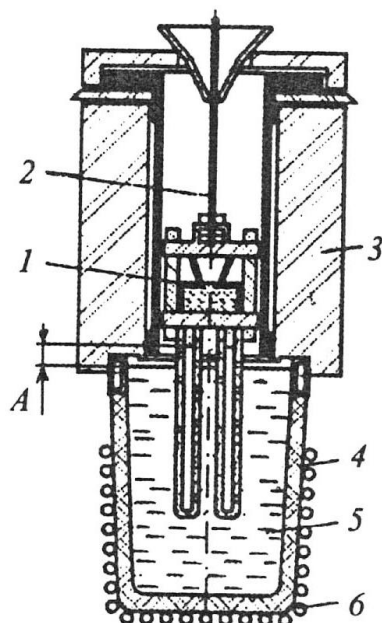


Рисунок 2.8 – Установка направленной кристаллизации в жидкометаллическом охладителе:

1 – керамическая форма; 2 – шток; 3 – печь для нагрева формы; 4 – тигель;  
5 – жидкометаллический охладитель; 6 – нагреватель

Как указывалось выше, методом направленной кристаллизации получают не только отливки со столбчатой структурой, но и *монокристаллические отливки* как из традиционных, так и специально разработанных для данного процесса сплавов. При создании сплавов для монокристаллического литья нет необходимости вводить в них элементы, упрочняющие границы зерен (С, В, Нf, Zr и др.), поскольку не существует большеугловых границ, что значительно расширяет возможности применения экономнолегированных жаропрочных сплавов для машиностроения.

Монокристаллические материалы широко используются также в тех областях техники, где необходимы уникальные значения их свойств, обеспечиваемые малодефектной структурой, их уникальная однородность по объему изделия – в микроэлектронике, оптоэлектронике, лазерной и атомной технике.

Существует много методов выращивания монокристаллов, основанных на гидромеханических, тепловых, массообменных, химических и механических процессах. Выращивание монокристаллов может происходить из твердой, жидкой и газовой фаз. Рассмотрение всех технологий получения монокристаллов не входит в планы данного пособия.

Рассмотрим лишь некоторые методы получения заготовок с монокристаллической структурой из жидкой фазы в процессе литья, применяемые, например, для получения жаропрочных сплавов на основе никеля.



Данные методы основаны на реализации одного из двух следующих условий: 1) создания условий для роста единичного кристалла и поддержании достаточно медленной скорости его роста; 2) наличия монокристаллической затравки (кристалла, на котором начинается рост заготовки), что снимает необходимость переохлаждения для образования критического зародыша и позволяет регулировать структуру растущего кристалла.

К методам, реализующим первое из указанных выше условий, относятся методы монокристаллического литья, основанные *на конкурентном росте столбчатых кристаллов*. Конкурентный рост зерен основан на приоритетном сохранении растущих с наибольшей скоростью столбчатых кристаллов, ориентированных в определенном направлении.

При получении монокристаллических отливок с водоохлаждаемым холодильником на практике используют эффект резкого сужения формы, благодаря чему из многих кристалликов, зарождающихся на поверхности холодильника, отбирают единственный кристалл, который первым достигнет этого сужения. В данном случае используется размерный ограничитель столбчатой структуры (селектор).

При прохождении поверхности кристаллизации через идущий вверх канал-селектор обеспечивается строгая ориентация преимущественного направления роста кристаллов вдоль оси селектора, поскольку кристаллы с другой ориентацией, упираясь в стенку наклонно или перпендикулярно идущему каналу, прекращают свое развитие. Вырастающий из литника-селектора кристалл является зародышем будущей монокристаллической отливки.

Схема процесса представлена на рис. 2.9.

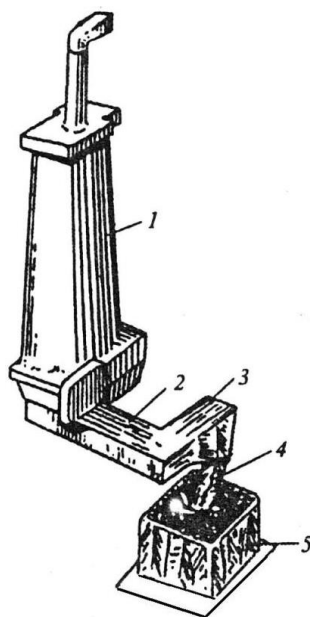


Рисунок 2.9 – Схематическое изображение структуры участков монокристаллического литья, основанного на конкурентном росте столбчатых кристаллов:

1 – отливка; 2-4 – литники; 5 – стартер

Для получения отливки используют керамическую оболочковую форму, изготовленную по выплавляемой модели. Форму (без дна) устанавливают на медный кристаллизатор, охлаждаемый водой, и заливают расплавом. Интенсивный направленный теплообмен приводит к зарождению в стартере 5 мелких равноосных зерен, приобретающих затем столбчатую, ориентированную в определенном направлении, структуру. В литниках 4-2 осуществляется последовательный конкурентный отбор одного кристалла с оптимальной ориентировкой. Последний дополнительный литниковый ход 2, перпендикулярный литнику 3 и названный поэтому «прямым углом», гарантирует попадание в отливку единственного кристалла с определенной ориентацией вдоль направления роста и произвольной его ориентацией в перпендикулярной данному направлению плоскости.

Требуемой ориентации кристаллической решетки вдоль и поперек направления затвердевания можно добиться использованием затравочных кристаллов либо созданием необходимой конструкции затравочной части формы.

Схема технологии, основанной на *использовании затравок при монокристаллическом литье*, приведена на рис. 2.10.

Особенность данного метода заключается в том, что монокристаллическая затравка 4 закрепляется в изготовленном из тугоплавкого сплава или керамики основании 3 и размещается в канале, находящемся в нижней части керамической оболочковой формы 2. Данный канал служит также для удаления модельного состава из формы в процессе ее изготовления.

Керамическую оболочковую форму 2 размещают на водоохлаждаемом поддоне-кристаллизаторе 5 и заполняют расплавом через питатель 1, расположенный в верхней части формы.

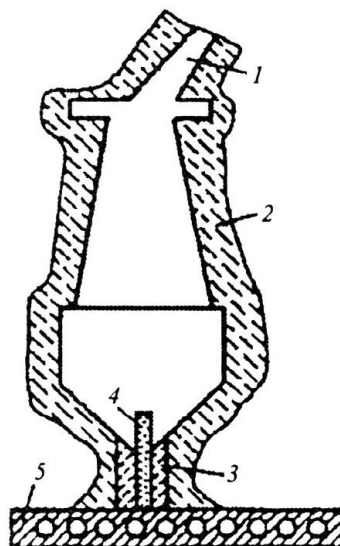


Рисунок 2.10 - Схема керамической формы для монокристаллического литья турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов от затравки:  
 1 – питатель; 2 – форма; 3 – основание, в котором находится затравка;  
 4 – затравка; 5 – поддон-кристаллизатор

Метод направленной кристаллизации является также одним из перспективных способов создания *естественных волокнистых композиционных материалов*, так называемых эвтектических композитов, или направленно-кристаллизованных эвтектик, см. п. 1.6.

Эвтектическими композитами называют сплавы эвтектического или близкого к эвтектическому состава, в которых упрочняющей фазой выступают ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации.

Из расплава, кристаллизующегося в условиях интенсивного направленного отвода тепла, «выпадают» параллельные направлению теплоотвода игольчатые или пластинчатые кристаллы, равномерно распределенные в матрице. Эти кристаллы (армирующая фаза) имеют механические свойства, близкие к свойствам нитевидных кристаллов, хорошо связаны с матрицей, поэтому прочность волокнистых эвтектик достаточно высокая.

Данный способ получения композитов, с одной стороны, базируется на использовании достаточно широко известной технологической операции – кристаллизации жидкости в условиях контролируемого теплоотвода, а с другой стороны, позволяет управлять структурными параметрами, в частности, морфологией и взаимной ориентацией фаз, а также их дисперсностью.

В отличие от обычных композиционных материалов, получаемых путем последовательного выполнения нескольких трудоемких технологи-

ческих операций, эвтектические композиты получают за одну операцию. Причем направленная ориентированная структура может быть получена уже на готовых изделиях. Это существенные преимущества эвтектических композиций по сравнению с другими технологиями получения композиционных материалов, см. п. 1.6.

Структура образующейся эвтектики в результате направленной кристаллизации состоит, как правило, из кристаллов твердой прочной фазы (карбидов, интерметаллидов), распределенных в матрице, представляющей собой твердый раствор. Форма образующихся кристаллов может быть, как указывалось выше, в виде волокон (при объемной доле упрочняющей фазы менее 32 %) или пластин (при большем содержании).

Равновесные условия кристаллизации обеспечивают высокую термическую стабильность эвтектических композиционных материалов и, как следствие, высокие механические свойства при температурах, близких к температурам плавления эвтектики.

Способами направленной кристаллизации получают композиционные материалы на основе Al, Mg, Cu, Ni, Co, Ti, Nb, Ta и других элементов. Поэтому эвтектические композиционные материалы могут эксплуатироваться в широком интервале температур.

Весьма перспективны материалы с температурой плавления выше 1200...1300 °С на основе эвтектик из тугоплавких оксидов. При этом в качестве тугоплавкой фазы используются оксиды алюминия, гафния, иттрия, титана, циркония, хрома и других металлов. Эвтектики на основе тугоплавких оксидов отличаются оптимальным комплексом свойств: высокими значениями удельной прочности и рабочих температур (до 0,8...0,9  $T_{пл}$ ), коррозионной стойкостью во многих средах, достаточно низкой пористостью.

В целом использование направленно-кристаллизованных эвтектик позволяет повысить рабочую температуру деталей на 30...80 °С, а длительную прочность – на 40 % и более. Использование литых эвтектических жаропрочных материалов перспективно, в первую очередь, в энергетическом машиностроении и космической технике.

### **2.5.2. Управление формированием кристаллического строения отливок в технологиях рео- и тиксолитья.**

#### **«Интеллектуальные» материалы**

В последнее десятилетие определяющей технологией заготовительного производства во многих отраслях техники, прежде всего, в автомо-

билестроении, является литье традиционных легких сплавов (на основе алюминия, магния) в твердожидком состоянии. К такой технологии относятся рео- и тиксолитье.

**Реолитье** – это литье непрерывно перемешиваемого полужидкого металла, в результате которого на ранних стадиях затвердевания происходит дробление твердых дендритов сплава (дендриты – кристаллы древовидной формы, характерные для литых материалов) на маленькие сферолиты (кристаллы сферической формы). Т.е. в данном методе литья формируется не традиционно дендритная, а глобулярная структура, т.е. структура, состоящая из компактных шаровидных кристаллов, обуславливающая особые физико-механические свойства металла.

В реолитье осуществляется заполнение формы сплавом, состоящим частично из жидкой, частично из твердой фазы («каши») – суспензии, т.е. сплавом, находящимся в состоянии, близком к пластическому.

Полужидкий металл, в силу своей вязкости и достаточной подвижности за счет скольжения твердых частиц в жидкой фазе, заполняет форму медленно, уменьшая вероятность образования газовых раковин и недоливов. При этом температурный интервал кристаллизации сплава в форме сводится к минимуму, что избавляет отливку от усадочных раковин.

При энергичном перемешивании (механическом или магнитогидродинамическом) у частично закристаллизованного сплава могут быть сохранены свойства жидкости до доли твердого ~ 50 %. Чем более энергично проводить перемешивание, тем в большей степени твердожидкий сплав обладает свойством жидкости. Подобным сплавам можно придавать форму с помощью различных методов литья, включая литье под низким и высоким давлением.

Получаемые реолитьем заготовки с глобулярной структурой обладают также следующим уникальным свойством. Если перемешивание частично закристаллизованного сплава прекратить, то кажущаяся вязкость поднимается до очень высокой величины, несмотря на то, что доля твердого остается постоянной. Вязкость становится настолько высокой, что материал ведет себя как твердое тело, которое можно, например, транспортировать, не нарушая начальной геометрической формы. Однако если снова провести его значительную сдвиговую деформацию, то материал проявляет свойства, подобные жидкости.

Таким образом, с помощью реолитья можно получить «заготовки» металла, позволить им затем приобрести свойства твердого тела, и после этого при заданной доле твердого использовать в качестве загрузки, например, в машину литья под давлением. Заготовки снова деформируют сдвигом (под давлением  $\sim 130 \dots 180$  МПа), они приобретают свойства, подобные вязкой жидкости, и равномерно текут, заполняя полость сложной формы, позволяя получать фасонные детали высокого качества. Подобные свойства заготовок называют *тиксотропными*, а сам процесс был назван *тиксолитьем*.

Тепловые условия формирования отливок и типичные микроструктуры отливок из сложнолегированного литейного алюминиевого сплава при реолитье и тиксолитье представлены на рис. 2.11, а, б. Для сравнения на рис. 2.11, в представлены тепловые условия и микроструктура того же сплава при традиционных способах литья.

В отличие от традиционных способов литья,  $\sim 50$  % твердой фазы будущей детали при реолитье формируют вне литейной оснастки в специальных условиях затвердевания. Процесс реолитья осуществляется в одну стадию, см. рис. 2.11, а.

При тиксолитье слиток охлаждают до комнатной температуры, затем разрезают на мерные заготовки, которые после повторного нагрева до твердотекучего состояния используют на машинах для литья под давлением или специализированных прессах, см. рис. 2.11, б.

Получаемые отливки имеют высокое качество, минимальное количество дефектов, низкую пористость, более высокие по сравнению с отливками, полученными традиционными методами, механические свойства (предел прочности, предел текучести) при одновременном существенном повышении пластичности. Например, пластичность отливок из литейного алюминиевого сплава АК7пч, полученных литьем под давлением, составляет  $\sim 2$  %, для отливок из этого же сплава после тиксолитья  $\delta$  повышается до  $14 \dots 18$  %.

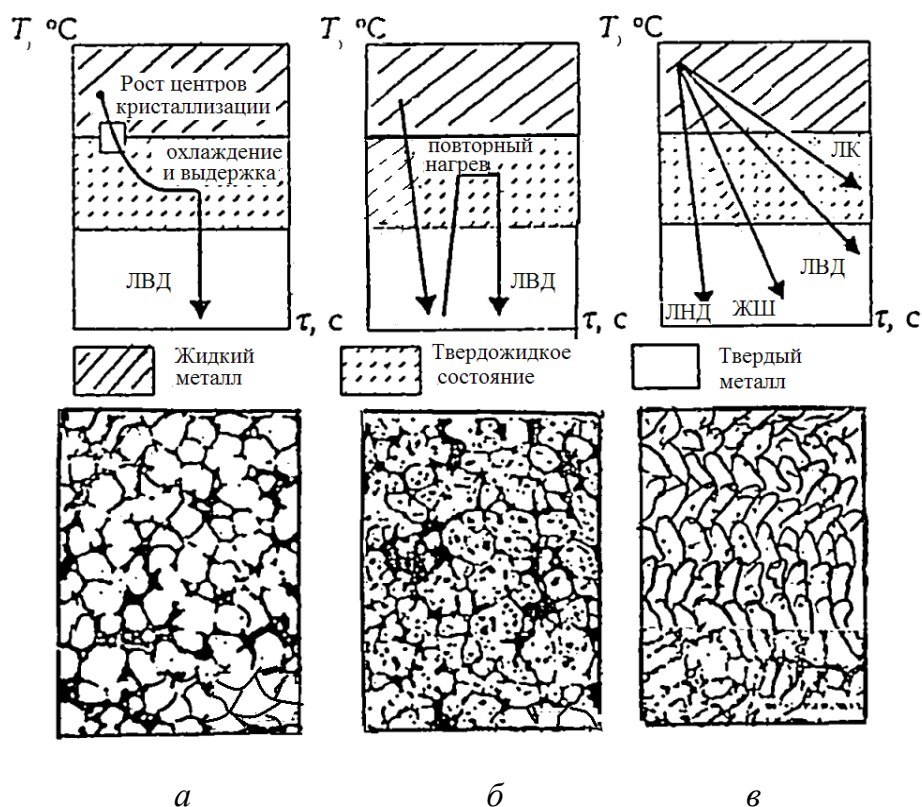


Рисунок 2.11 – Тепловые условия формирования и типичные микроструктуры отливок из алюминиевого сплава:

*a* – реолитье; *б* – тиксолитье; *в* – традиционные способы литья:

ЛК – литье в кокиль; ЛНД – литье под низким давлением;

ЛВД – литье под высоким давлением; ЖШ – жидкая штамповка

Тиксоформирование – новый, перспективный и активно изучаемый промышленный процесс. Несмотря на большое разнообразие вариантов процесса, общая схема тиксоформирования подразделяется на три стадии: производство стержневой заготовки (реолитьем), повторное частичное расплавление мерной заготовки и формообразование детали в условиях сдвига, рис. 2.12.

Перспективными направлениями использования литья в полужидком состоянии является не только литье легких сплавов (Al, Mg), но и сплавов с высокой температурой плавления, например, на основе железа и меди, получение композиционных материалов. Так, формообразование в режиме тиксолитья – наиболее перспективный метод получения высококачественных литых деталей из Al-матричных композиционных материалов с дисперсными частицами SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и т.п. (см. п. 1.6).

Благодаря рео- и тиксолитью для методов точного литья становятся доступными сплавы, ранее считавшиеся лишь деформируемыми, возможно проведение упрочняющей термообработки.

Новый процесс открыл также дорогу для эффективного использования нетехнологичных для литья сплавов с широким интервалом кристаллизации, значительным содержанием примесей, т.е. вторичным сплавам.

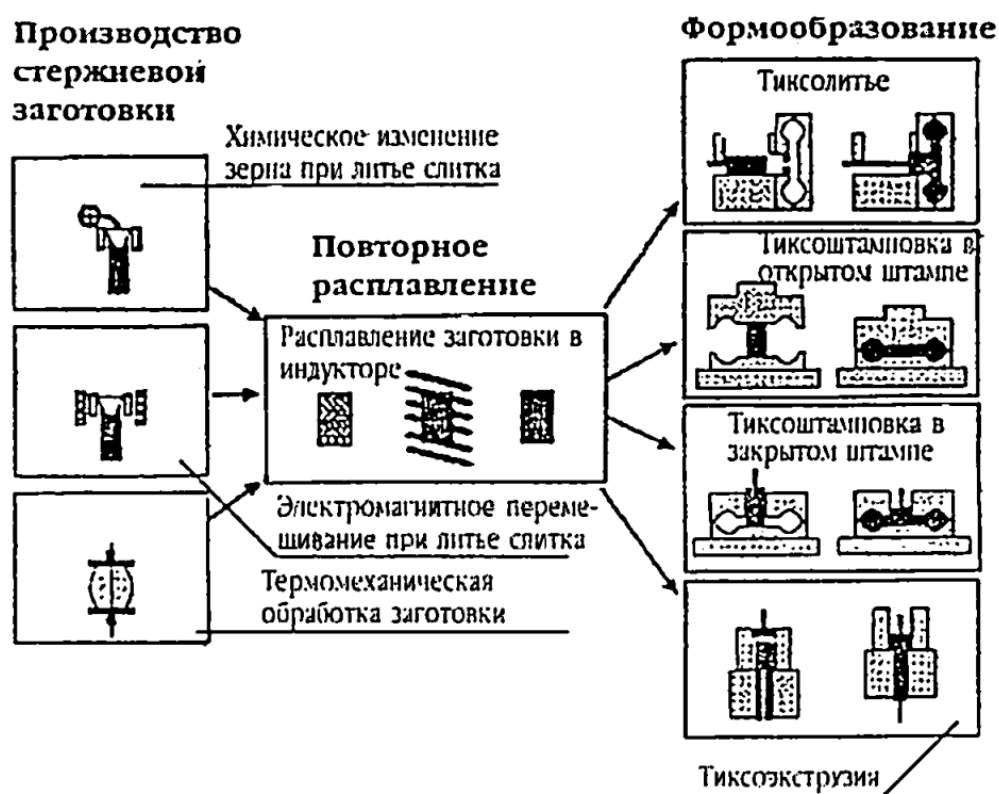


Рисунок 2.12 – Схема процессов тиксоформирования

Технологии рео- и тиксолитья получили признание в мировой литейной практике и уже достаточно широко применяются во многих странах Западной Европы, в США, в Японии.

В 2003 г. объем производства отливок из алюминиевых сплавов тиксолитьем составил ~2 % всего объема производства отливок из этих сплавов и продолжает стремительно расти. Организовано непрерывное литье специальных заготовок для автомобилестроения массой от 1 до 18 кг, что перекрывает большинство потребностей автомобильной промышленности.

Для более эффективного использования новых процессов создается соответствующее литейное оборудование: устройства для приготовления полужидкого сплава, его механизированной подачи в камеру прессования.



В последние годы особое внимание уделяется созданию так называемых «интеллектуальных» материалов и интеллектуализации промышленных технологических процессов производства изделий из традиционных материалов. О создании «интеллектуальной» литейной оснастки уже шла речь в п. 2.4.3.

Термин *«интеллектуальные» материалы* появился в начале XXI века. «Интеллектуальные» материалы представляют собой логический результат исторического развития материалов в ряду: конструкционный материал – композиционный материал – функциональный материал – «интеллектуальный» материал.

Формирующиеся в настоящее время концепции «интеллектуальных» материалов связывают его функциональные свойства с качествами, присущими живому организму, т.е. со способностью объекта при внешнем воздействии распознавать возникшую ситуацию, реагировать на изменение окружающей среды (сенсорная функция); вырабатывать стратегию поведения, т.е. оценивать ситуацию и делать выводы (процессорная функция); возбуждать необходимую реакцию, т.е. реализовать исполнительное свойство, при котором материал совершает действие или подает сигналы (эф- фекторная функция). Подобные классы «интеллектуальных» материалов позволяют реализовать новые подходы в создании материалов с заранее заданными свойствами.

Предполагается, что существенный вклад в разработку и развитие указанной концепции, в формирование физических представлений, необходимых для создания данного класса материалов должны внести новые методы литья – реолитье, тиксолитье, поскольку получаемые с помощью данных технологий материалы в достаточной мере обладают свойствами, присущими «интеллектуальным» материалам.

## **2.6. Способы литья с непрерывным процессом формирования отливки**

### **2.6.1. Непрерывное литье и перспективы его развития**

Создание технологии непрерывного литья металлов и оборудования для реализации этой технологии явилось одним из наиболее крупных достижений в промышленности в XX веке и оказало существенное влияние на развитие металлургии и машиностроения.

Идея непрерывного литья предусматривает отказ от литья отдельных порций металла в слитки (в изложницах) и реализации их дальнейшей обработки (прокатки и др.) только после затвердевания этой порции металла. Сущность непрерывного литья заключается в изготовлении протяженных отливок свободной непрерывной заливкой расплавленного металла в водоохлаждаемый графитовый или металлический кристаллизатор и вытягиванием из него сформированной части отливки.

Непрерывное литье сегодня применяется не только для стали, но и чугуна, цветных металлов.

Достоинствами метода являются: возможность получения длинномерных заготовок; однородность структуры и свойств по длине заготовок; высокие плотность и механические свойства отливок; высокое качество и производительность; малоотходность; снижение капитальных затрат (отпадает необходимость парка изложниц, крупных дорогостоящих прокатных станов – блюмингов и слэбингов – для обжатия слитков на заготовки для последующей прокатки); оптимальное сочетание особенностей работы современных прокатных станов и возможностей непрерывного литья; создание предпосылок для полной автоматизации и механизации процесса; улучшение условий труда и экологии.

Непрерывным литьем получают заготовки для последующей прокатки – квадратные, круглые, прямоугольные; проволочные заготовки; чугунные трубы (диаметром до 1000 мм и толщиной стенки до 50 мм); швеллеры; ленты; направляющие станин металлорежущих станков; заготовки для гаек, шестерен, прокатных валков.

Современная установка для непрерывного литья представляет собой сложный комплекс технологического, механического, гидравлического и электронного оборудования.

Разные требования и концепции развития технологии привели к разработке нескольких типов машин непрерывного литья заготовок, рис. 2.13, а.

В настоящее время наиболее распространены установки горизонтального типа, рис. 2.13, б, а также радиального, криволинейного типа (т.е. с изгибом заготовки в процессе кристаллизации). Вертикальные установки менее экономичны и используются только при очень высоких требованиях к чистоте металла и для сталей с повышенной чувствительностью к надрезам либо для изготовления полых отливок (например, труб).

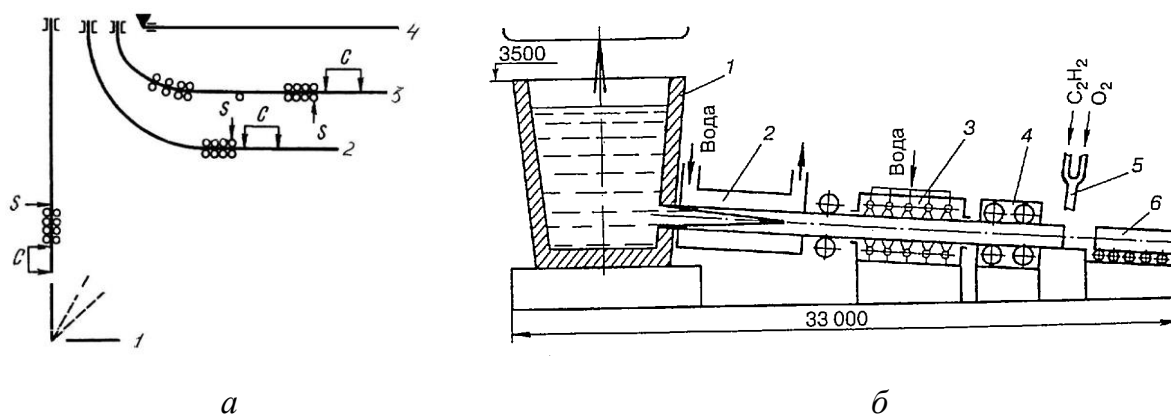


Рисунок 2.13 – Схемы непрерывного литья заготовок:

*а* – типы машин для непрерывного литья заготовок (МНЛЗ):

1 – вертикальная; 2 – радиальная; 3 – криволинейная; 4 – горизонтальная;  
С – зона порезки заготовки; S – конец затвердевания заготовки;

*б* – установка для непрерывной разливки стали  
горизонтального типа:

1 – промежуточный ковш; 2 – кристаллизатор; 3- зона вторичного охлаждения; 4 – тянущий механизм; 5 – разрезное устройство; 6 - заготовка

Рассмотрим некоторые новые перспективные решения в развитии технологии непрерывного литья.

▼ Достаточно широко уже применяется *центробежное или роторное непрерывное литье*, состоящее в использовании вращающегося кристаллизатора цилиндрической формы.

Под действием центробежных сил, возникающих в расплаве при его вращении, получается затвердевшая поверхностная корка высокого качества; неметаллические включения, имеющие меньшую плотность, перемещаются при вращении к центру заготовки, откуда легко удаляются.

Вращение слитка обеспечивает также ускоренное и равномерное охлаждение, облегчает процесс резки.

Ускоренная кристаллизация дает возможность использовать кристаллизатор меньшей высоты.

▼ Применение *установок валкового, ленточного или конвейерного типа* позволяет сократить технологический цикл при получении тонких слабов, тонкого листа, мелких профилей, ленты высокого качества.

В данном методе кристаллизующийся металл движется вместе с кристаллизатором (по сути, это развитие метода бесслитковой прокатки).

На установках валкового типа металл при разливке поступает в зазор между двумя вращающимися водоохлаждаемыми валками, рис. 2.14, *а*.

Установки валкового типа применяют для непрерывной разливки тонких слэбов.

На установках ленточного типа металл из ковша поступает в пространство между бесконечной лентой и колесом; внутренняя поверхность ленты и обод колеса представляют в этом случае кристаллизатор, рис. 2.14, б.

На установках ленточного типа получают профили небольшого сечения, например, проволоку или тонкую ленту. Существуют также установки, в которых роль кристаллизатора играют две водоохлаждаемые бесконечные ленты; они применяются для получения тонких листов.

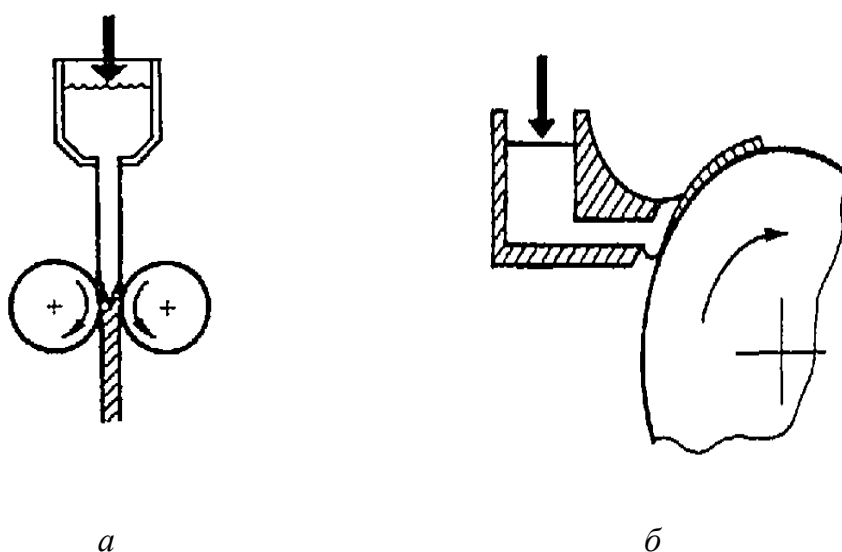


Рисунок 2.14 – Схема установок валкового (а) и ленточного (б) типа

▼ Следующий шаг в развитии технологии – *совмещение непрерывной разливки с прокаткой*, что позволяет обеспечить экономию электроэнергии, необходимой для подогрева заготовок перед прокаткой, и повышение производительности благодаря снижению потерь, а также улучшение качества стали даже при небольшом обжатии слитка.

Крупные комплексы такого типа действуют на ряде заводов мира; их производительность колеблется от сотен тысяч до 2 млн. т заготовок в год. Передача непрерывнолитых заготовок на прокатный стан без промежуточного нагрева получила название *прямой прокатки*.

Одна из схем колесно-ленточной установки для непрерывного литья, совмещенной с прокатным станом, приведена на рис. 2.15.

Установка работает следующим образом. Из сталеразливочного ковша 1 через промежуточный ковш 2 сталь поступает на литейное (лен-

точное) колесо 3. Ленточное колесо диаметром 3 м с выемкой трапецеидального сечения на ободу и прижимаемая к ободу на участке около 90° бесконечная стальная водоохлаждаемая лента 10 образуют кристаллизатор длиной до 2 м. Благодаря большей (в 2,5 раза), чем обычно, длине кристаллизатора производительность такой установки существенно выше производительности установок традиционного типа.

На выходе с колеса заготовку разгибают по плавной траектории при помощи направляющих роликов 9. Затем заготовка проходит через правильное устройство 4, зону охлаждения, устройство для выравнивания температуры по сечению 5, ножницы 6 и поступает в обжимную клеть 7,8, формирующую квадратную заготовку.

Экономичность работы установки обеспечивается ее высокой производительностью, экономией затрат на электроэнергию для нагрева заготовок, повышением выхода годного до 99 %.

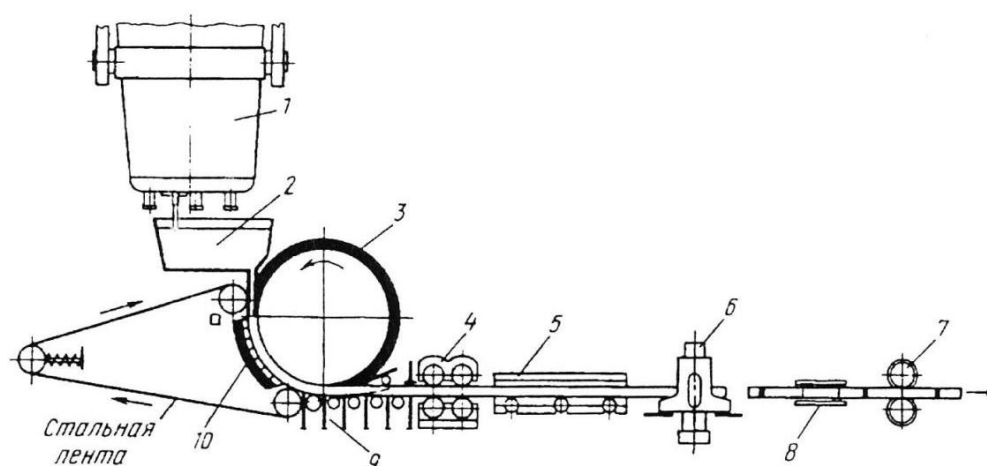


Рисунок 2.15 – Колесно-ленточная установка для непрерывной разливки стали, совмещенная с прокатным станом конструкции *Hitachi* (Япония)

▼ Особую роль при непрерывном литье играют вопросы качества металла и обеспечения однородности структуры. Поэтому перспективными являются разработки, связанные со способами воздействия на металл различными устройствами, материалами и физическими полями для повышения качества продукции. Многие из этих технологий находятся в стадии разработки.

Например, *разливка под давлением*, заключающаяся в выдавливании жидкой стали в кристаллизатор из ковша, помещенного в камеру высокого давления, через специальный патрубок. Существует положительная прак-

тика такого метода для получения слябов из специальных сталей толщиной до 400 мм.

Находит также применение в непрерывном литье технология с *продувкой жидкого металла инертными газами*.

Существует практика (Институт электросварки им. Е.О.Патона) введения в сталь стальных прутков, лент, металлической дроби, сыпучих материалов, что уменьшает время затвердевания и улучшает структуру металла.

Установлена определенная эффективность *ультразвуковых колебаний*, источником которых может служить затравка, стенки кристаллизатора: при этом измельчается зерно и улучшается структура слитка.

Известен ряд патентов, посвященных воздействию на слиток *инерционных эффектов*, производящих положительный эффект на структуру и качество металла. Например, в одном из них предлагается перемещать слиток с периодическими ускорениями, толчками, встряхиванием.

В качестве средства получения мелкозернистой структуры предлагается также использование *электромагнитных полей* для перемешивания металла. Ряд зарубежных фирм (*Sumitomo, Nippon Steel* и др.) получают ответственные стальные заготовки, например, трубные, только при использовании электромагнитных полей.

Для литья легких сплавов, например, алюминия, применяется электромагнитный кристаллизатор, в котором расплав приобретает форму индуктора.

▼ Одним из перспективных направлений развития непрерывного литья является *увеличение скорости литья*, а за счет этого – производительности. Дело в том, что скорость литья является важным технологическим параметром, определяющим основные технико-экономические показатели процесса. Допустимая скорость литья, т.е. скорость движения слитка, ограничена прочностью корки слитка под кристаллизатором.

В настоящее время с целью увеличения скорости литья, а значит, и производительности процесса, проводятся исследования прочности корки слитка и возможностей ее увеличения, например, при усилении интенсивности ее охлаждения и уменьшении температуры. Данные исследования весьма перспективны и будут продолжаться в ближайшие десятилетия.

Реально достигнутые на сегодняшний день скорости литья – до 6...10 м/мин для малых сечений (скорость литья обратно пропорциональна квадрату наименьшего размера сечения). Предполагается увеличить

скорость литья для тонких слябов (25...40 мм) до 15...20 м/мин, а для листов толщиной 1,5...3,0 мм до 150...220 м/мин.

▼ Важным шагом в развитии непрерывного литья является *использование металлолома*. Например, при непрерывном литье алюминия из металлолома затраты электроэнергии составляют только 10...12 % той энергии, которая требуется для производства изделий из первичного алюминия. Уже существуют такие специальные заводы в США, Японии.

▼ Достаточно многообещающими являются работы по созданию оригинальной конструкции установки непрерывного литья для *переплава радиоактивных отходов*.

В целом можно сделать вывод, что метод непрерывного литья является достаточно перспективной технологией, возможности которой сегодня реализованы не в полной мере и существуют множественные пути ее совершенствования. Можно с полной уверенностью предположить, что на протяжении всего XXI века будут увеличиваться и объем металлов, получаемых непрерывным литьем, и сортамент слитков (литых заготовок). Расходы энергии и объемы потерь металла будут уменьшаться. Для ряда установок непрерывного литья вполне реален процесс с выходом годного 98...99 %. Особое место займут вопросы экологии и улучшения условий труда.

### 2.6.2. Электрошлаковое литье

При электрошлаковом литье расплавление металла, заполнение им литейной формы и затвердевание отливки происходят непрерывно и одновременно. В обычной литейной технологии эти операции разобщены, что ухудшает качество отливки и снижает производительность процесса.

В данной технологии литейная форма (сложной формы кристаллизатор) выполняет две функции: служит плавильным агрегатом и формирует отливку, рис. 2.16. Процесс происходит под слоем электропроводного шлака с высоким электросопротивлением, например, фторида кальция или составляющих на его основе, который служит источником тепла, очищает металл от вредных примесей, защищает от атмосферного воздействия, является тепловой надставкой кристаллизующемуся металлу.

Процесс начинается с заливки в литейную форму-кристаллизатор 5, полость которой соответствует конфигурации отливки 4, расплавленного

шлака 2, опускания в него расходуемого электрода 1 и пропускания через систему кристаллизатор – шлак – электрод электрического тока ( $I = 20 \text{ А}$ ,  $U = 45 \dots 60 \text{ В}$ ). При прохождении электрического тока через расплав шлака в нем (вследствие высокого сопротивления) выделяется большое количество теплоты, под действием которой происходит оплавление конца электрода. Жидкий металл в виде капель проходит сквозь шлак, очищается в нем и скапливается под шлаком, образуя металлическую ванну 3. Расход электрода компенсируется его перемещением вертикально вниз. Кристаллизация происходит снизу вверх с участием малых объемов материала.

Достоинствами технологии являются высокая однородность структуры и свойств отливок, повышение их эксплуатационных свойств, экономия металла за счет отсутствия литниковой системы, повышение коэффициента использования металла, уменьшение трудоемкости, улучшение условий труда.

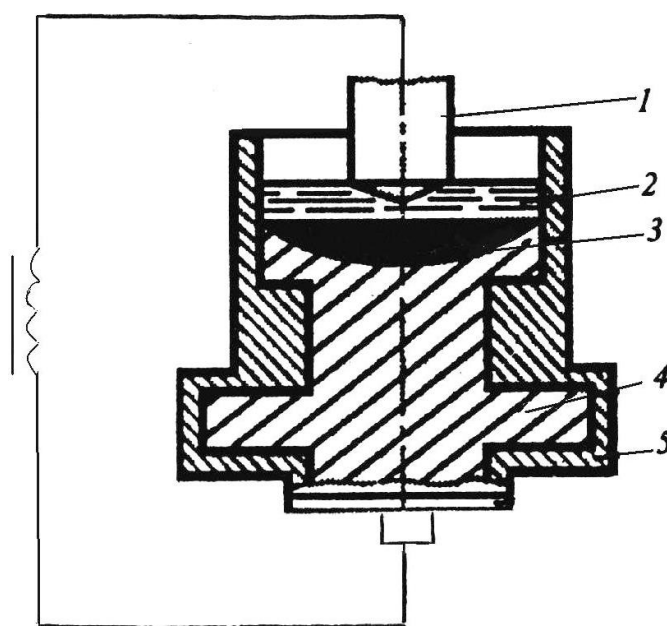


Рисунок 2.16 – Схема получения отливок способом электрошлакового литья

Способ успешно заменяет ряд операций, выполняемых ковкой, штамповкой и сваркой при изготовлении ряда ответственных деталей. Электрошлаковым литьем получают как мелкие отливки (в том числе в медицине – зубопротезной практике), так и крупные – массой до 300 т, например, валки прокатных станов, коленвалы судовых дизельных двигателей,



детали арматуры – корпуса клапанов и задвижек электростанций, детали атомных станций, сосуды сверхвысокого давления и др.

## **2.7. Выбор рационального способа изготовления отливок**

### **2.7.1. Требования к отливкам**

**Технические требования**, предъявляемые к отливкам, подразделяют на общие и специальные. При оценке технических требований к отливкам руководствуются соответствующими ГОСТами (ДСТУ) и ОСТами. Кроме того, ряд специальных требований может отражаться в документации, например, в чертежах, на изготовление литых деталей.

**Общие требования** регламентируют точность отливок, шероховатость поверхности, механические свойства, качество литого металла.

Точность отливки оценивается, согласно ГОСТ 26645-85 (с изменением №1 от 1989 г.), классами размерной точности (КРТ) и точности массы (КТМ), а также степенью коробления (СК) и точности поверхностей (СТП). При этом обязательными являются требования по соблюдению соответствия отливки заданным классам размерной точности и точности массы.

*Размерная точность* отливки представляет собой степень соответствия фактических и указанных в чертеже (или технических условиях) размеров. ГОСТ 26645-85 предусматривает 22 класса размерной точности – от 1 по 16, а также 3т, 5т, 7т, 9т, 11т, 13т. Более высокому значению КРТ соответствуют большие допуски на размеры отливок, т.е. тем меньшей точностью характеризуется отливка.

Точность размеров отливки определяется рядом факторов:

– габаритными размерами и сложностью конфигурации отливки. Чем сложнее форма и больше габаритные размеры отливки, тем сильнее возрастает погрешность при изготовлении литейной формы и модельной оснастки и, как следствие, тем ниже точность ее размеров. Кроме того, укрупнение и усложнение конфигурации отливки способствуют снижению стабильности температурного режима в процессе ее кристаллизации и охлаждения;

– способом литья. Наибольшая размерная точность достигается при литье под давлением, а также литье по выплавляемым моделям, наименьшая – при литье в песчано-глинистые формы, центробежном литье. При этом каждый способ характеризуется специфическими факторами, обуславливающими точность отливок;

– типом сплава. Так, в большинстве случаев при литье легких сплавов на основе алюминия и магния точность отливок выше, чем при литье сплавов с большей плотностью.

*Точность массы* отливки оценивается классами точности массы, число и нумерация которых совпадают с таковыми для классов размерной точности.

*Шероховатость поверхности* отливок чаще всего оценивается по наибольшим или номинальным значениям параметров  $R_a$  (среднего арифметического отклонения) и  $R_z$  (высоты неровностей профиля по десяти точкам). На шероховатость оказывают влияние размер и конфигурация (сложность формы) отливки, состав сплава и способ литья. Наименьшие значения шероховатости поверхности достигаются при литье под давлением, по выплавляемым моделям.

Получение заданных размеров отливки, шероховатости ее поверхности и качества поверхностного слоя обеспечивает *припуск на обработку отливок резанием*. Припуски на обработку каждой поверхности зависят от класса размерной точности отливки, ее габаритных размеров, формы, расположения обрабатываемых поверхностей, способа литья и состава сплава.

**Специальные требования** к отливкам обусловлены их функциональным назначением и условиями эксплуатации. К данным требованиям относятся: обеспечение герметичности в условиях вакуума, а также в достаточно широком диапазоне давления газа или жидкости; обеспечение коррозионной стойкости в агрессивных средах, термостойкости, износостойкости, а также комплекса этих свойств и т.д.

Реализация указанных специальных требований к отливкам достигается выбором необходимого состава литейного сплава, оптимального метода литья, механической и термической обработки, а также формированием на поверхности отливки функциональных защитных и декоративных покрытий.

### 2.7.2. Сравнительная характеристика способов литья и рекомендации по выбору рационального способа

Современные требования, предъявляемые к литым заготовкам деталей машин, характеризуются максимальным приближением отливок по форме и размерам к готовым деталям, экономией металла, применением прогрессивных способов литья.

При выборе оптимального способа получения литых заготовок и деталей следует проводить сравнительный анализ возможных вариантов рассматриваемых технологических процессов литья.

Определяющими критериями сравнительного анализа являются следующие: масса и габаритные размеры отливок; технические требования к отливкам; технико-экономические показатели, учитывающие расход металла, стоимость оборудования и технологической оснастки (коэффициент использования металла, себестоимость детали в изготовлении, экономически оправданная серийность).

При прочих равных условиях решающими факторами, обуславливающими выбор рационального способа литья, являются *серийность и экономичность процесса*.

В единичном, мелкосерийном и серийном производстве отливки зачастую изготавливаются литьем в песчано-глинистые формы, по выплавляемым моделям. В крупносерийном и массовом производствах применяют литье под давлением, в кокиль, в оболочковые формы, центробежное литье, литье в песчано-глинистые формы, изготавливаемые на формовочных машинах или автоматических линиях, и др.

Кроме того, при выборе рационального способа литья для получения качественных отливок необходимо учитывать *литейные свойства сплавов*.

Например, если сплав имеет пониженную жидкотекучесть, то нежелательно применять литье в металлические формы-кокили. В этом случае целесообразно использовать литье под давлением, литье по выплавляемым моделям и другие способы, применение которых повышает жидкотекучесть сплава. Если для изготовления отливок используется сплав с высокой усадкой, то нежелательно применять литье в кокиль и под давлением,

так как возможно образование трещин в отливках из-за низкой податливости форм и усадочных раковин вследствие сложности установки прибылей.

При выборе способа литья следует учитывать также *степень сложности* отливки. Сложные по конфигурации отливки получают литьем под давлением, по выплавляемым моделям или в песчано-глинистых формах.

Литьем в кокиль получают отливки с простой наружной конфигурацией, а отливки типа тел вращения получают, как правило, центробежным литьем. Наиболее тонкостенные отливки получают литьем по выплавляемым моделям и литьем под давлением.

В табл. 2.2 приведены технологические возможности и сравнительные технико-экономические показатели различных способов литья.

Следует учитывать, что выбор рационального способа литья является сложной многокритериальной задачей, для решения которой целесообразно использовать ЭВМ. Использование ЭВМ для выбора способа получения отливок предопределяет наличие математической модели и алгоритма соответствующего процесса.

Исходной информацией для выбора способа изготовления отливки с помощью ЭВМ являются чертеж детали и технические требования: материал детали; программа выпуска; параметры, по которым осуществляется оптимизация способа и т.д.

Таблица 2.2 – Технологические возможности различных способов литья

Показатель	Способ литья					
	ЛПФ	ЛОФ	ЛВМ	ЛК	ЛПД	ЦЛ
1	2	3	4	5	6	7
Материал отливок	Сталь, чугун, цветные сплавы	Сталь, чугун, цветные сплавы	Сталь, чугун, цветные сплавы, спец. сплавы	Сталь, чугун, цветные сплавы	Цветные сплавы	Сталь, чугун, цветные сплавы
Максимальная масса отливок, кг	200000	150	150	7000 – чугун, 4000 – сталь, 500 – цветные сплавы	100	600

Продолжение табл.2.2

1	2	3	4	5	6	7
Максимальный размер отливок, мм	Неогранич.	1500	1000	2000	1200	6000
Минимальная толщина стенки, мм	3,0	1,5	0,5	2,2	0,5	4,0
Класс размерной точности отливок (ГОСТ 26645-85)	6...14	4...11т	3...8	4...11т	3т...7	6...15
Шероховатость поверхности, мкм	320...80	160...40	80...20	160...40	40...10	320...80
Минимальный припуск на механическую обработку (на сторону), мм	0,3...6,0	0,4...2,0	0,1...0,6	0,4...1,0	0,2...0,5	0,3...1,0
Линейные уклоны, град.	0,5...3	1...2	1...2	0,5...1,2	0,5...1	1...6
Коэффициент использования металла, %	60...70	80...95	90...95	75...80	90...95	70...90
Относительная себестоимость 1 т отливок	1,0	1,5...2,0	2,5...3,0	1,2...1,5	1,8...2,0	0,6...0,7
Экономически оправданная серийность, шт./год	Неогранич.	200...500	1000	400...800	1000	100...1000

Условные обозначения: ЛПФ – литье в песчано-глинистые формы; ЛОФ – литье в оболочковые формы; ЛВМ – литье по выплавляемым моделям; ЛК – литье в кокиль; ЛПД – литье под давлением; ЦЛ – центробежное литье

## 2.8. Перспективы развития литейного производства Украины

Основными тенденциями развития литейного производства Украины, наметившимися в последние годы, являются следующие.

♦ *Тенденция к «демассификации» производства.* Большие специализированные литейные предприятия-«центролиты» в современных условиях не перспективны. Многие из в прошлом мощных предприятий либо ликвидированы, либо находятся на грани банкротства. Реализуется поход к выполнению индивидуальных запросов потребителей литья и созданию производств, достаточно эффективных при изготовлении относительно небольших партий продукции, обладающих набором индивидуальных параметров.

♦ *Тенденция к гибкости и маневренности производства* и к сокращению величины партий (серийности) выпускаемых изделий, создание гибких производственных систем, позволяющих быстро переналаживать производство на выпуск новых, затребованных рынком и промышленностью изделий.

♦ *Использование современных технологий менеджмента и маркетинга;* совмещение преимуществ, присущих различным способам получения отливок; выполнение заказов «точно в срок» и с соблюдением индивидуальных требований заказчика.

♦ *Ускоренное развитие технологических процессов и технологий (преимущественно, специальных способов литья),* которые коммерчески перспективны, представляют интерес для развивающихся предприятий малого и среднего бизнеса и могут обеспечить получение литейной продукции достаточно высокого качества при умеренной ее цене.

♦ *Сохранение высокой доли чугунных отливок* общем объеме выпуска литья, увеличение производства отливок из высокопрочных чугунов и чугунов со специальными свойствами. Замена ковкого чугуна на высокопрочный содержит значительные резервы экономии энергетических и материальных ресурсов, позволяет снизить трудоемкость и улучшить качество отливок.

♦ *Увеличение выпуска отливок из специальных сплавов,* в т.ч. цветных. Из цветных сплавов наиболее распространены в литейной промышленности алюминиевые и магниевые сплавы, прочностные свойства которых можно увеличивать до 500 МПа и выше, изменяя химический состав, применяя новые технологии, в том числе тиксолитье, непрерывные способы литья с магнитодинамическими методами перемешивания кристаллизующихся сплавов, а также совмещая литье и прокатку.

♦ *Развитие теоретических исследований и научных прикладных работ в сфере литейной науки*, которые в данный момент не всегда отвечают фактическим потребностям отрасли и машиностроения в целом. Основными направлениями научных исследований в области литейного производства являются следующие:

- компьютерное моделирование литейных процессов. Ожидаемый результат: минимизация дефектов в изделиях, сокращение и утилизация отходов производства;
- разработка новых методов литья и высоких технологий, обеспечивающих стабильно высокое качество отливок;
- разработка новых материалов и сплавов с «пакетом» уникальных характеристик, расширяющих область применения литейного производства;
- создание технологий получения виртуальных отливок и разработка на их основе оптимальных литейных параметров применительно к требованиям заказчика;
- более широкое внедрение технологий ускоренного прототипирования (*Rapid Prototyping*).

В ближайшие годы предполагается уделить особое внимание развитию отраслевой науки. Это даст возможность проанализировать перспективу отдельных способов литья и выделить приоритетные направления их развития в условиях украинской экономики, комплексно оценить влияние инноваций и новых знаний на развитие литейной промышленности Украины и доработать до уровня использования на предприятиях ресурсосберегающие и экологически безопасные технологии.

Литейная наука Украины должна наверстать упущенное в разработках предыдущих лет, стать «мозговым центром» и успешно решать проблемы машиностроения и оснащения литейных предприятий передовыми технологиями и прогрессивным оборудованием.

♦ *Создание литейного оборудования нового типа для малых и средних литейных предприятий (цехов)*, в т.ч. совмещающего преимущества нескольких способов литья.

Эта проблема особенно актуальна, т.к. изношенные (порой до 90 %) и морально устаревшие основные фонды литейных предприятий Украины существенно сдерживают развитие литейной науки и производства. Остро стоит также вопрос реновации бывшего в употреблении оборудования. Это

согласуется с общемировой тенденцией – международный рынок продаж бывшего в употреблении оборудования лишь на 5...10 % уступает в коммерческом выражении объему продаж нового оборудования. В условиях недостаточного финансирования путь перевооружения литейной отрасли через реновацию существующего оборудования для предприятий Украины наиболее доступен и экономически оправдан.

- ♦ *Компьютеризация* всего производственного процесса с целью гибкого управления ходом производственных операций. Создание локальных вычислительных сетей на малых и средних предприятиях.

- ♦ Ужесточение мероприятий по контролю *качества продукции* в соответствии с требованиями рыночных отношений. Поставка на внутренние и внешние рынки продукции только высокого качества с расширением номенклатуры, объемов производства и области применения.

Для украинского литья всегда был характерен достаточно высокий уровень качества, однако традиционно качество отливок контролировалось лишь на конечном этапе, на выходе, а европейская система качества подразумевает работу в рамках системы качества, т.е. поэтапный контроль, в процессе всего производственного цикла, и выход на финишную операцию уже с гарантированными результатами.

- ♦ *Ресурсосбережение и контроль над издержками производства*, что обеспечит снижение себестоимости продукции и повышение ее конкурентоспособности.

- ♦ Соблюдение норм и требований по *охране окружающей среды*.

- ♦ *Расширение внешнеэкономических связей* литейной отрасли. Для литейной промышленности Украины важно найти свое место в международном разделении труда и на рынках литейной промышленности, осуществлять прямое взаимовыгодное сотрудничество с предприятиями, научными центрами и специалистами зарубежья.

В настоящее время литейное производство Украины постепенно выходит из кризиса 90-х годов и возвращает себе статус одной из ведущих отраслей промышленности.

При этом наряду с освоением перспективных технологических процессов, материалов и оборудования необходимо проведение ряда организационных мероприятий, способствующих повышению качества литых заготовок. В современных условиях отсутствия централизованного управления промышленностью (а в Украине сегодня насчитывается около полуго-



ра тысяч предприятий литейного направления) огромное значение в консолидации научно-технического потенциала ученых, инженерных работников и производителей, координации деятельности и защите их интересов приобретают общественные организации, в том числе и Ассоциация литейщиков Украины (АЛУ).

Основными задачами АЛУ на ближайшие годы являются: оценка научно-технического потенциала действующих производств, создание банка данных используемых материалов, технологических процессов и оборудования для литейного производства и разработка соответствующих нормативно-технических документов; разработка и создание единой методики и средств оценки экологической обстановки вблизи литейных предприятий и на рабочих местах, разработка экологически чистых технологических процессов, материалов и оборудования; создание нормативно-технической документации и методических материалов, соответствующих мировым стандартам, системам качества и разработка на их основе единой системы сертификации качества литейной продукции и т.д.

### **Вопросы для самостоятельного контроля**

1. Какова структура современного литейного производства?
2. Как изменилась структура выпуска отливок по сплавам на рубеже XX и XXI веков? Какие сплавы сегодня преобладают в качестве литейных и почему?
3. Какие изменения произошли в номенклатуре выпускаемых отливок?
4. Какие способы литья относят к точным?
5. Опишите сущность литья под давлением и возможности данной технологии.
6. В чем сущность литья по выплавляемым и газифицируемым (выжигаемым) моделям? Каковы их преимущества перед другими технологиями литья?
7. Какие материалы применяются в качестве модельных в способах литья по выплавляемым и газифицируемым моделям? Каковы основные требования к модельным материалам?
8. Что такое «газифицируемые модели с имплантатами» и где они применяются?
9. Как реализуется самораспространяющийся высокотемпературный синтез? Где возможно его применение?

10. Что такое «СВС-литье»?
11. Каким образом СВС используется в технологии литья по газифицируемым моделям?
12. В чем сущность технологий ускоренного прототипирования? Какие основные *RP* - процессы Вам известны?
13. Опишите возможности совместного использования *RP*- процессов и литейных технологий.
14. Какие технологии ускоренного прототипирования применяются для изготовления литейных моделей, какие материалы при этом применяются?
15. Опишите примеры применения *RP*-технологий для получения литейной оснастки в различных способах литья.
16. Что такое «интеллектуальная оснастка» и как ее получают?
17. Какие Вы знаете основные методы управления структурой отливок в процессе их кристаллизации?
18. В чем заключается метод направленной кристаллизации, в каких ситуациях его применение целесообразно?
19. Как создается структура монокристаллических отливок и где они применяются?
20. Что такое «рео- и тиксолитье»? В чем особенность этих процессов по сравнению с традиционными?
21. Какие направления применения технологий реолитья и тиксолитья являются перспективными?
22. В чем особенность «интеллектуальных» материалов?
23. Какие Вы знаете методы непрерывного формирования отливок?
24. В чем сущность непрерывного литья заготовок?
25. Какие заготовки получают непрерывным литьем и где они применяются?
26. Каковы перспективы развития непрерывного литья?
27. В чем сущность электрошлакового литья? Где применяются получаемые заготовки?
28. Какие факторы являются определяющими при выборе рационального способа литья?
29. Сопоставьте различные способы литья по основным технико-экономическим характеристикам.
30. Каковы основные тенденции развития литейного производства Украины?



### 3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

#### 3.1. Сверхпластичность и ее использование в процессах ОМД

##### 3.1.1. Сущность явления сверхпластичности. Основные типы сверхпластичности

Под **сверхпластичностью** понимают способность металла к значительной пластической деформации ( $10^2 \dots 10^3$  %) в определенных условиях при одновременном малом сопротивлении деформированию (1...10 МПа), рис. 3.1.

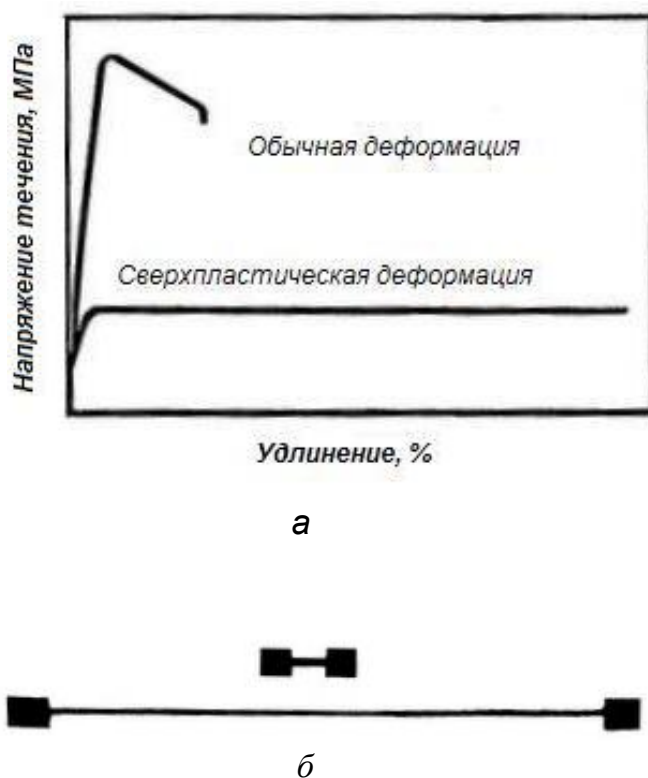


Рисунок 3.1 – Типичные деформационные кривые для обычной и сверхпластической деформации (а) и геометрические параметры образца до и после сверхпластической деформации (б)

Явление сверхпластичности открыто российскими учеными А.А. Бочваром и З.А. Свидерской. В 1945 г. была опубликована их статья о необычайно высокой пластичности сплава Zn-Al и введен термин «сверхпластичность». Факт открытия этого явления получил признание во всем мире, хотя об аномально высокой пластичности сообщалось и в более

ранних работах, например, в работе английского преподавателя металлургического колледжа С. Пирсона (1939 г.), описавшего поведение эвтектических сплавов Sn-Pb и Sn-Bi, по всем признакам соответствующее сверхпластическому. Образец Sn-Bi при растяжении удлинился на 1950 %, т.е. в 20 раз.

Динамика более чем 60-летнего развития исследований по проблеме сверхпластичности свидетельствует о постоянном росте интереса к этому явлению не только ученых-физиков, но и со стороны специалистов в области металлообработки, и прежде всего, обработки металлов давлением.

Реальный прогресс в понимании сути явления сверхпластичности наметился в конце 60-х годов XX в., поскольку появились возможности исследования структуры материалов современными дифракционными методами. Тем не менее, понадобились еще десятилетия для понимания как природы явления, так и возможности его использования на практике. Изучение явления и открытие новых его возможностей продолжается и в наши дни и будет являться предметом изучения в будущем.

Сверхпластичность – это не уникальное явление, а состояние материала. Перечень металлов и сплавов, которые можно перевести в состояние сверхпластичности, насчитывает до 70 различных материалов, в том числе алюминий, цинк, магний, медь, хром, титан, никель, железо, олово, кадмий, а также сплавы на их основе, многие из которых имеют широкое промышленное применение. Деформация этих сплавов в условиях сверхпластичности открывает новые технологические возможности их обработки давлением и позволяет получать практически неограниченные степени деформации при напряжениях, которые на порядок меньше обычных.

Известно несколько *типов сверхпластичности*, наиболее распространенными являются: структурная сверхпластичность (микрозеренная, изотермическая) и «сверхпластичность превращения» (трансформационная, динамическая).

**«Сверхпластичность превращения»** можно наблюдать в материалах с любым размером зерна в случае их деформации в области температур фазовых превращений. Природа сверхпластичности в данном случае связана с так называемым «предпревращением», заключающемся в значительном изменении свойств металла или сплава (например, модуля нормальной упругости) без изменения структуры вблизи температуры фазовых превращений.

«Сверхпластичность превращения» характерна для полиморфных

металлов и сплавов, испытывающих при определенных температурах фазовые превращения, например, для железа, титана, олова, кобальта, циркония и др. Так, чистое железо испытывает  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение при температуре 910 °С, а при температуре 850...910 °С находится в состоянии сверхпластичности.

Пластическое течение в этих условиях можно представить как результат направленного смещения отдельных атомов под действием напряжений, возникающих в образце при его деформации. Такой вид деформации обычно называют диффузионной ползучестью. Этот процесс протекает с малой скоростью, что существенно ограничивает скорости деформации заготовки в условиях сверхпластичности.

Так, при деформации железа в условиях сверхпластичности скорость деформации  $d\varepsilon/dt = 10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , при этом деформация  $\delta$  составляет до 500 %, а сопротивление деформации (предел текучести  $\sigma_T$ ) не превышает 2 МПа. Для сравнения: при растяжении в обычных условиях и близкой температуре относительное удлинение  $\delta$  составляет всего 45...50 %, а предел текучести  $\sigma_T = 30 \dots 50 \text{ МПа}$ .

**Структурная сверхпластичность** наиболее распространена, представляет большой практический интерес по сравнению со сверхпластичностью превращения.

Основными факторами, определяющими переход металлов и сплавов в сверхпластичное состояние при структурной сверхпластичности, являются размер зерен и температурно-скоростные условия деформации:

▼ для реализации эффекта структурной сверхпластичности в металлах и сплавах необходимо *формирование высокодисперсной микроструктуры с размером зерна менее 10 мкм* (что в 100 раз мельче зерна обычной структуры промышленных металлов и сплавов), стабильной в процессе деформации при постоянной температуре;

▼ для реализации сверхпластичности необходимы *условия горячей пластической деформации*, т.е.  $T = (0,5 \dots 0,6) T_{пл}$ ;

▼ *скорость деформации  $d\varepsilon/dt$  должна составлять  $10^{-6} \dots 10^{-1} \text{ с}^{-1}$* , что на несколько порядков ниже традиционно применяемых в процессах ОМД. Ограничение по скорости деформации при сверхпластичности является одной из самых больших проблем при использовании этого эффекта в процессах ОМД.

В указанных условиях свойства сплавов существенно отличаются от

свойств обычных металлов и сплавов и приближаются по реологическим характеристикам (реология – наука, изучающая процессы, связанные с необратимыми остаточными деформациями и течением различных вязких и пластичных материалов) к вязким веществам и полимерам.

При сверхпластической деформации зерна не повторяют деформацию образца: удлинение образца в тысячи процентов оставляет зерна практически равноосными.

При реализации сверхпластичности действуют следующие основные механизмы деформации: зернограницное проскальзывание (подобно движению частиц в сыпучих материалах), внутризеренное дислокационное скольжение и диффузионная ползучесть.

Главным механизмом сверхпластической деформации является зернограницное скольжение, что вызывает необходимость получать малый размер зерна и сдерживать его укрупнение при деформации при высоких температурах в течение всего периода деформирования (порядка десятков минут).

Для измельчения зерна применяются разные способы, включающие термическую или термомеханическую обработку, обработку давлением.

### **3.1.2. Применение эффекта сверхпластичности**

Ряд особенностей, характеризующих металлы в состоянии сверхпластичности – чрезвычайно большая деформационная способность, малое напряжение течения, слабое влияние сверхпластической деформации на микроструктуру – обеспечивают возможность значительного повышения эффективности процессов обработки металлов давлением и качества готовых изделий. В настоящее время промышленная сверхпластическая формовка является признанной реальностью и реализована для получения целого ряда заготовок и деталей.

Формоизменение материалов в условиях сверхпластичности целесообразно в следующих ситуациях: при деформировании малопластичных сплавов, практически не поддающихся обработке давлением в обычных условиях; при штамповке заготовок с элементами небольшой толщины (высокими и узкими ребрами, тонкими полотнами), которые в обычных условиях можно получать только с большими напусками; при повышении точности, особенно для деталей из дорогостоящих металлов; при штам-

повке крупногабаритных деталей, требующих в обычных условиях деформирующего оборудования большой мощности; при штамповке поковок, к качеству и надежности которых предъявляются повышенные требования.

Реализация эффекта сверхпластичности в технологических процессах ОМД позволяет за одну операцию на серийном или специализированном оборудовании сравнительно небольшой мощности получать заготовки сложной формы, близкой к конечной форме деталей, и, соответственно, резко уменьшить трудоемкость и стоимость изготовления изделия, повысить коэффициент использования металла.

С другой стороны, малые скорости деформации, соответствующие состоянию и регламентированному температурному режиму деформации, существенно усложняют и удорожают подготовку производства, снижают производительность технологических процессов и в результате ограничивают использование сверхпластичности в ОМД. Дополнительными трудностями при широком использовании этого явления в традиционных процессах ОМД, например, прессовании, объемной штамповке, прокатке, являются также дороговизна используемых сплавов, необходимость поддержания определенной температуры в течение длительного времени при выдержках, отсутствие специализированного оборудования.

Выходом из этих проблем является использование специально разработанных под условия сверхпластичности процессов, а также использование традиционно используемого для ОМД оборудования при его модернизации.

Наиболее распространены процессы сверхпластической формовки листовых материалов.

Малые напряжения течения, характеризующие деформацию сверхпластичных материалов, способствуют тому, что более предпочтительным средством для их деформирования оказывается давление газа (обычно 0,1...2,1 МПа), а не штампы, приводимые в движение гидравлически или механически, что позволяет обойтись без дорогостоящего и дефицитного специального оборудования и осуществлять деформацию в простых штампах, снабженных пневматической системой избыточного давления. Таким образом, процессы сверхпластической формовки листа существенно отличаются от процессов, используемых для обычных металлов и сплавов, и имеют много общего со способами, применяемыми для формовки термопластов.



Основными методами получения заготовок и деталей из листа в условиях сверхпластичности (методами сверхпластической формовки) являются: *негативная и реверсивная пневматическая формовка; вакуумная формовка; пневматическая формовка с применением неподвижного и подвижного пуансона*. Схемы некоторых методов представлены на рис. 3.2.

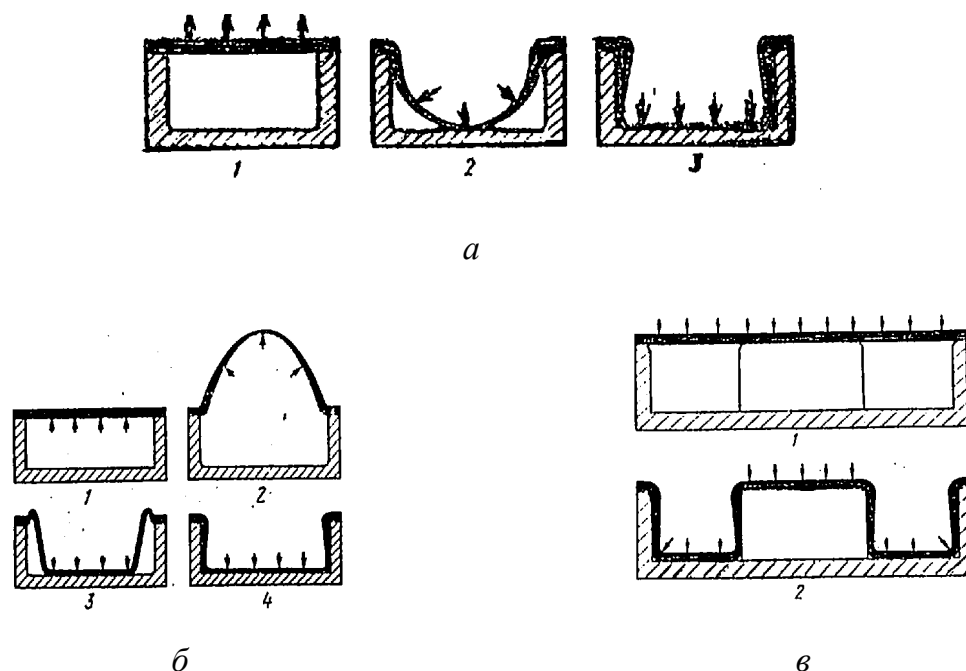


Рисунок 3.2 – Схемы процессов сверхпластической формовки:  
*а* – пневматическая негативная формовка; *б* – пневматическая реверсивная формовка; *в* – формовка по неподвижному пуансону в полости матрицы

Методы пневматической и вакуумной формовки аналогичны соответствующим методам обработки листовых термопластичных материалов.

Так, пневматическая негативная формовка основана на деформации тонких (1...2 мм) листов сверхпластичного материала, прижатого к матрице, давлением сжатого воздуха, см. рис. 3.2, *а* (1), в результате чего материал повторяет очертания полости в матрице, см. рис. 3.2, *а* (2,3). Для уменьшения разнотолщинности материала, присущей негативной формовке, применяют реверсивную формовку, при которой сначала лист «выдувают» в полость, противолежащую полости матрицы, см. рис. 3.2, *б* (1,2), а затем давление подают в противоположную полость для выдувки листа в матрицу и получения нужной формы, см. рис. 3.2. *б* (3,4).

Относительно простым вариантом процесса пневматической формовки, который позволяет уменьшить разнотолщинность, является фор-

мовка по неподвижному пуансону, когда лист обтягивает пуансон, расположенный в полости матрицы, см. рис. 3.2, в (1,2).

Методом вакуумной формовки изделия требуемой конфигурации из листовых сверхпластичных материалов получают в результате вытяжки под действием разности давлений, возникающей вследствие создания разрежения в полости формы, над которой герметично закреплен лист исходного сверхпластичного материала. Листовой материал втягивается в полость формы, повторяя ее очертания. Установка для реализации метода достаточно проста, метод применяется для получения несложных по конфигурации изделий.

Для получения относительно глубоких и сложных форм заготовок обычно применяют технологические способы, основанные на перемещении пуансона относительно плоскости листа, аналогично вытяжке обычных металлов и сплавов.

Кроме технологий получения изделий из листа, эффект сверхпластичности реализуется также в традиционных процессах ОМД – прокатке, волочении, объемной точной штамповке.

Рассмотрим некоторые примеры практического использования сверхпластичности.

**♥ Изготовление полых, сложных по форме или требующих глубокой вытяжки готовых изделий.**

Преимущества сверхпластической формовки: возможность получения сложных объемных изделий (цилиндрических, коробчатых) из листа за один переход с большой степенью деформации в отличие от традиционных технологий многопереходной штамповки; возможность получения деталей с заданным утонением и определенными механическими свойствами, существенное упрощение технологического процесса и применяемого оборудования.

Такие детали получают из алюминиевых и титановых сплавов, например, АМг6, МА8, ВТ6, ОТ4-1 и др. Проводятся исследования по применению данной технологии для формовки изделий из листа композиционных материалов с металлической матрицей и даже из керамики.

Области применения получаемых изделий – аэрокосмическая промышленность (носовые, боковые и хвостовые обтекатели, кресла катапульт, детали воздушных кондиционеров, корпуса обтекателей шасси для гражданских и военных самолетов); электроника (защитные обшивки в ап-

паратуре связи, терминалы компьютеров, портативные корпуса для размещения компактной электронной аппаратуры); медицинское оборудование (барокамеры, рентгеновское и ультразвуковое оборудование); транспорт (панели кузовов, кожухи автоматических механизмов); строительство (панели) и т.д.

♥ *Получение крупногабаритных деталей машиностроения*, например, панелей с вафельным оребрением, изготовление которых традиционными методами ОМД (штамповки) требует уникальных прессов усилием 30...75 тыс.т. Использование явления сверхпластичности позволяет существенно снизить усилие деформации.

♥ *Формообразование различных видов инструментов*. Такие изделия, как элементы пресс-форм, матрицы и пуансоны для объемной штамповки, фрезы, зенкеры, развертки в основном пока изготавливают резанием, что сопряжено с большими потерями дорогостоящих и дефицитных инструментальных сталей (свыше 50 % материала идет в стружку), с высокой загрузкой механических цехов.

Получение указанных изделий методами ОМД позволяет повысить коэффициент использования металла, однако вызывает необходимость применения деформирующих инструментов из материалов с еще более высокими механическими характеристиками. Выдавливание инструментальных сталей в условиях сверхпластичности дает возможность преодолеть это техническое противоречие. Кроме того, быстрорежущие стали Р18, Р6М5, применяемые для изготовления режущего инструмента, уже в состоянии поставки имеют мелкокристаллическую структуру, поэтому для перевода их в сверхпластическое состояние достаточно выбрать оптимальную температуру и скорость деформации. Углеродистые инструментальные стали (У8А, У10А) для измельчения зерна требуют предварительной термической или термомеханической обработки.

Исследования показали, что сверхпластическим выдавливанием можно получать развертки, фрезы, зенкеры из стали Р6М5 при  $T = 810...820\text{ }^{\circ}\text{C}$ , скорости деформации  $10^{-1}\text{ с}^{-1}$ , удельном усилии деформации 180...250 МПа, что на порядок меньше, чем при обычных условиях.

Потенциал технологии сверхпластической деформации далеко не исчерпан; исследуются и развиваются новые направления использования этого явления в различных отраслях машиностроения и других отраслях

промышленности. Рассмотрим некоторые перспективные направления использования явления сверхпластичности.

♥ В последние годы интенсивно растет интерес к **сверхпластичности** таких материалов как **керамика и интерметаллиды**, отличающихся высокими прочностными свойствами, жаропрочностью, высокой коррозионной и радиационной стойкостью, что делает их весьма привлекательными для использования в качестве конструкционного и инструментального материала.

Традиционно применяемые методы порошковой металлургии не позволяют получать сложные по конфигурации керамические изделия либо требуют применения дорогостоящей последующей механической обработки алмазным инструментом, что в итоге сказывается на стоимости готовых деталей. Поэтому применение технологий ОМД, преимуществами которых является возможность значительного уменьшения отхода материалов, высокая производительность, достаточно высокая сложность получаемых изделий, высокие физико-механические свойства, безусловно, расширило бы номенклатуру заготовок и деталей из столь перспективного материала, как конструкционная и инструментальная керамика.

Повышенная склонность керамики к хрупкому разрушению связана с исключительно низкой подвижностью дефектов, обусловленной, прежде всего, специфическим (ионно-ковалентным) характером связи в керамических структурах. Поэтому усилия исследователей направлены в первую очередь на устранение таких микроскопических дефектов керамики, которые выступают в роли центров зарождения трещин. Один из способов достижения этой цели состоит в тщательной очистке, очень тонком размоле исходного порошка и плотной его упаковке перед спеканием.

Сверхпластическое деформирование керамики, обладающей жесткой кристаллической решеткой, обеспечивается, аналогично металлам, за счет межзеренного скольжения, причем размер зерен должен быть на порядок меньше, чем в сверхпластичных металлических материалах.

Вторым существенным фактором, влияющим на сверхпластическое деформирование керамики, является температура. Она должна обеспечивать достаточно высокую интенсивность диффузионных процессов. Если она превышает  $T_{\text{диф}}^{\text{max}}$ , происходит интенсивный рост зерен и, соответственно, потеря сверхпластичности. Понижение температуры ниже  $T_{\text{диф}}^{\text{min}}$  приводит к резкому ослаблению диффузионных процессов, а затруднение

межзеренного скольжения, в свою очередь, приводит к потере сверхпластичности.

Для заполнения межзеренных несплошностей, возникающих при межзеренном скольжении, скорость деформации должна быть соизмерима с очень низкими скоростями диффузии. Поддержание скорости деформации в заданном диапазоне позволяет обеспечить сверхпластичность керамики и является основным параметром управления при сверхпластической деформации.

Получение сверхпластичной керамики за счет специфических условий подготовки сырья и спекания (получения мелкокристаллического керамического материала) позволяет преодолеть этот недостаток и делает доступным для керамики такие виды ОМД, как ковка, штамповка, волочение, экструзия. При этом относительное удлинение керамических материалов в состоянии сверхпластичности может достигать 120...150 % и даже более; в обычном состоянии керамические материалы могут деформироваться без разрушения не более, чем на 1...3 %.

Из керамических материалов активно исследуются оксиды, относящиеся к классу конструкционных керамик –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , композиты из этих материалов. Режимы сверхпластического деформирования керамических материалов используются для разработки технологических процессов ОМД, например, штамповки, для получения лезвий режущего инструмента, в производстве подшипников.

Японскими учеными обнаружены признаки сверхпластичности у биоактивной керамики – гидроксиапатита  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , используемого в качестве исходного материала для ортопедических и стоматологических протезов.

Среди интерметаллидов наибольший интерес вызывают алюминиды титана и никеля, силициды никеля, более сложные композиции.

♥ Проводятся работы по **увеличению степени деформации**, получаемой материалами в результате реализации сверхпластичности. Зафиксирован ряд рекордных результатов (Япония), например, удлинение 8000 % при растяжении образцов из промышленной алюминиевой бронзы. Среди керамических материалов наибольшее удлинение получено у диоксида циркония – более 800 %, среди композиционных материалов с металлической матрицей – до 1400 %.

♥ Как указывалось выше, одним из серьезных препятствий для ис-

пользования сверхпластичности являются малые скорости деформации. Однако результаты последних исследований показали проявление сверхпластичности у алюминиевых и медных сплавов при скоростях, существенно превышающих даже скорости деформации, характерные для любых традиционных процессов ОМД, включая штамповку взрывом. Такой тип пластичности был назван **высокоскоростной сверхпластичностью**.

Явление высокоскоростной сверхпластичности обусловлено локальным плавлением границ зерен, содержащих сегрегации (скопления) примесных атомов.

Расширение диапазона скоростей деформации, в котором проявляется сверхпластичность, не только устраняет негативное влияние малых скоростей, существенно ограничивающих производительность процессов, основанных на использовании сверхпластичности, но и позволяет разрабатывать новые эффективные технологические процессы.

♥ Важным перспективным направлением является также **разработка пакетов программ для компьютерного моделирования процессов сверхпластического формообразования**. Математические модели позволяют в достаточно короткие сроки получать необходимые данные для разработки технологических процессов, создавать компьютерные программы активного управления технологическими параметрами процесса формообразования, например, рабочим давлением при сверхпластической формовке листа, скоростью перемещения штампа при объемной штамповке.

♥ Перспективным является также использование сверхпластичности для интенсификации процессов соединения металлов в твердом состоянии. Например, весьма эффективна **технология сверхпластической формовки в сочетании с диффузионной сваркой (СПФ/ДС)** для получения деталей аэрокосмической промышленности (ячеистых панелей и многокомпонентных несущих конструкций летательных аппаратов), для получения других тонкостенных конструкций сложного профиля из листа с высоким коэффициентом использования материала при относительно низких энергетических и капитальных затратах.

Данная технология преимущественно используется для получения изделий из титановых сплавов, что основано на двух особенностях данных материалов – склонностью к сверхпластичности и диффузионной свариваемостью. Применение технологии СПФ/ДС позволяет добиться значительного снижения стоимости и веса конструкций по сравнению с традицион-

ными способами обработки титана, обеспечивает получение деталей, которые не могут быть изготовлены другими способами. Вместо сборных узлов и механически обработанных деталей типичные конструкции в данном случае состоят из элементов, отформованных из листа и сваренных в виде пустотелых профилей, слоистых конструкций.

Процесс обеспечивает высокие механические свойства сварного шва (на уровне свойств исходного металла), что повышает работоспособность конструкции в целом, обеспечивает ее удешевление (на 30...50 %), уменьшение объема механической обработки и веса конструкций (на 20...30 %).

Некоторые примеры получаемых деталей: противопожарные стенки вертолета, топливные емкости, люки вспомогательного силового агрегата самолета, лонжерон для высокоскоростной авиации, воздуходувное сопло, люк двигателя, рамы кабин самолетов, обшивки, обтекатели, рис. 3.3.

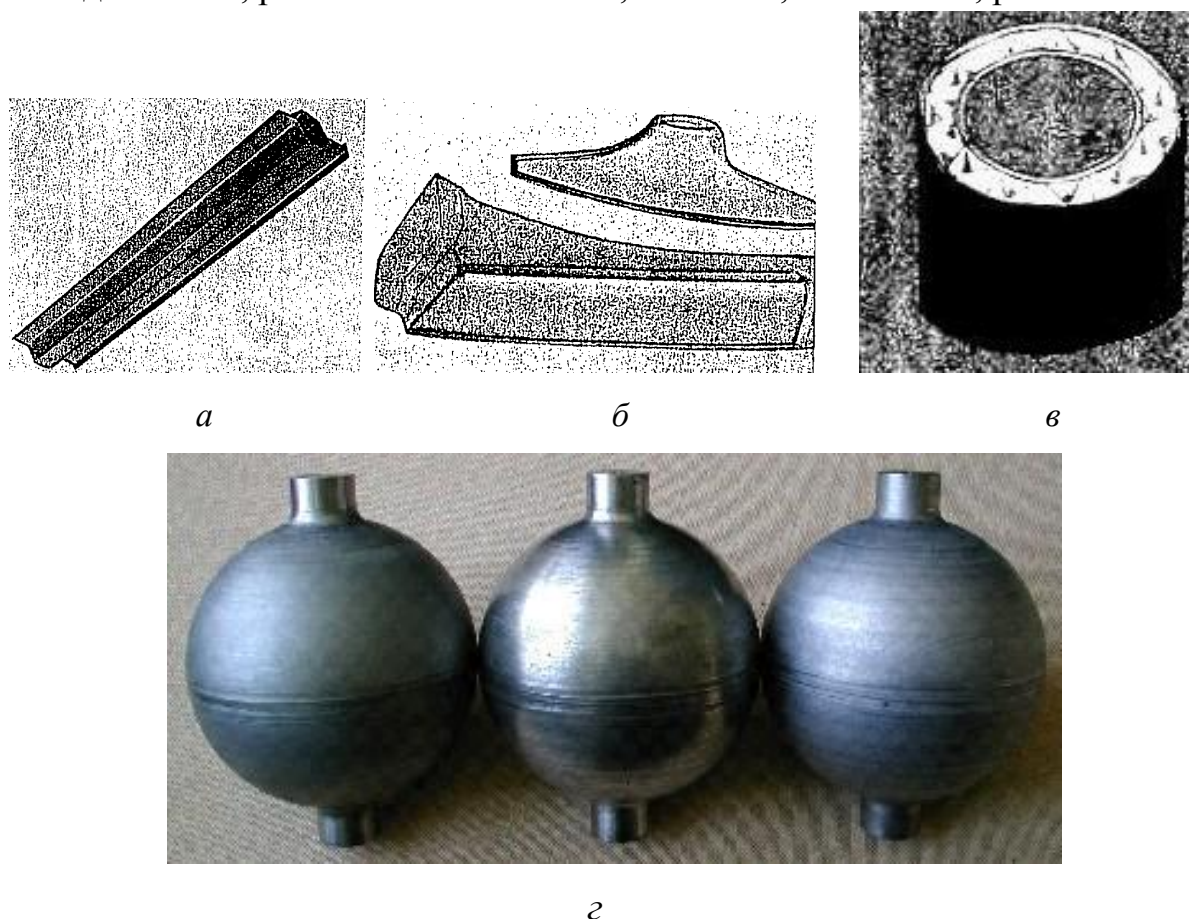


Рисунок 3.3 – Некоторые виды изделий, полученных технологией сверхпластической формовки в сочетании с диффузионной сваркой:  
*а* – изготовленный из двух листов титана методом СПФ/ДС лонжерон, включающий элементы жесткости;  
*б* – горячее воздуходувное сопло козырька самолета, изготовленное методом СПФ/ДС; *в* – кольцевая слоистая деталь;  
*г* – сферические сосуды высокого давления из титановых сплавов

До недавнего времени эта технология применялась только для титановых сплавов. Использование алюминиевых сплавов исключалось в связи с наличием плотной оксидной пленки на их поверхности. Детальное изучение механизма диффузионной сварки, влияния на прочность соединения различных защитных покрытий и прослоек, использование для диффузионной сварки режимов сверхпластической деформации позволило реализовать технологию СПФ/ДС для высокопрочных алюминиевых сплавов.

♥ Новым направлением в использовании эффекта сверхпластичности является исследование возможности **использования интенсивных электромагнитных полей** для формообразования изделий в режиме сверхпластичности и воздействия на структуру металлов. Преимущества использования импульсных магнитных полей для создания деформирующих усилий при формообразовании сверхпластичных материалов заключаются в том, что ввиду отсутствия пуансона отпадают и проблемы уменьшения контактного трения с заготовкой и обеспечения его стойкости при высокой температуре.

### 3. 2. Особенности жидкой и полужидкой штамповки

Данная технология является комбинацией литья и обработки давлением и сочетает в себе преимущества обеих технологий, позволяя при этом в определенной мере избежать их недостатков.

**Жидкой штамповкой (литьем с кристаллизацией под давлением)** называют технологический процесс получения заготовок деталей, при котором кристаллизация жидкого металла, залитого в полость металлической пресс-формы, происходит под высоким давлением. Данная технология весьма перспективна вследствие своей экономичности и высокого качества получаемых изделий.

При жидкой штамповке обеспечивается повышение коэффициента теплоотдачи и, следовательно, скорости охлаждения, потому структура металла получается более мелкозернистой, чем в отливках. Кристаллизация под давлением и деформирование предотвращают образование усадочных раковин и газовой пористости (растворимость водорода растет с повышением давления). В связи с этим получают повышенные механические свойства поковок. Наличие высоких давлений улучшает заполнение полости штампа и качество поверхности.



Особенности процесса позволяют снять ограничения по применяемым сплавам и приводить замену дорогостоящих сплавов на менее дорогостоящие и более распространенные без ухудшения физико-механических характеристик изделий. Так, кроме цветных сплавов (алюминиевых, медных), стали, заготовки и детали методом жидкой штамповки можно также изготавливать из чугуна, который, как известно, вследствие малой пластичности давлением не обрабатывается.

Используют разные схемы технологического процесса штамповки:

▼ По основной схеме металл заливают в полость штампа, рис. 3.4, соответствующую форме поковки, сжимают пуансоном и производят таким образом кристаллизацию под давлением.

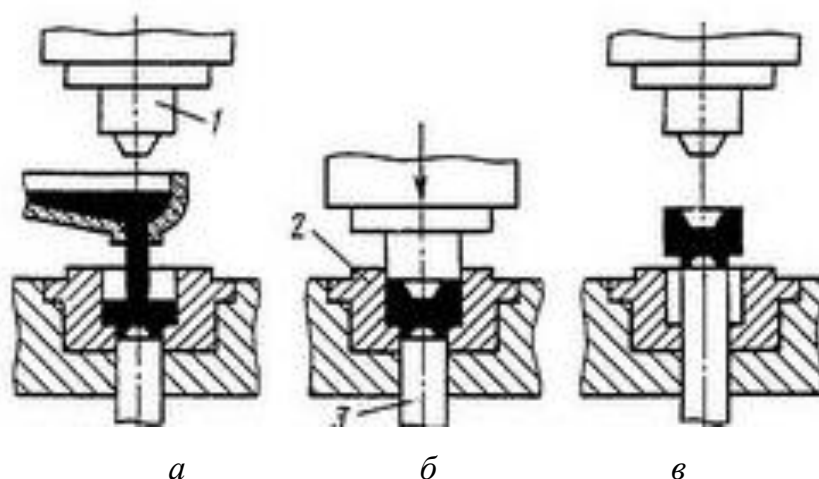


Рисунок 3.4 – Основные стадии процесса жидкой штамповки

Штампы для жидкой штамповки в большинстве случаев состоят из трех формообразующих частей, см. рис. 3.4: вкладыша 2 и выталкивателя 3, образующих матрицу, а также пуансона 1, устанавливаемого на подвижном ползуне пресса. Материал штампов – легированные молибденом стали; для цветных металлов рекомендуют углеродистые стали.

▼ Вторая схема предусматривает частичное затвердевание металла под давлением в полости, отличной от окончательной формы поковки; затем следует деформация в полужидком состоянии до получения окончательных размеров поковки. Штамповку металла в полужидком состоянии называют *тиксотропной штамповкой*.

▼ В третьем случае после полной кристаллизации под давлением сле-

дует деформация в твердом состоянии для получения окончательных размеров поковки.

Выплавка и дозированная заливка металла в полость штампа – первая и достаточно важная стадия технологического процесса жидкой штамповки.

Выплавку металла производят или в объеме, необходимом для получения одной поковки, или в плавильном агрегате большего объема с последующей дозировкой при заливке металла в штамп. При заливке важно поддерживать оптимальную температуру металла, достаточную для обеспечения его жидкотекучести и заполнения полости штампа и исключающую при этом перегрев металла.

Штамповку жидкого металла выполняют на специализированных гидравлических и фрикционных прессах. Специализация прессов обусловлена необходимостью обеспечения следующих характеристик: большой скорости холостого хода; регулируемого, плавного нажима на пуансон без резких скачков его перемещения; возможности монтажа плавно-заливочных устройств и т.д.

Значения основных параметров процесса: величина давления 100...500 МПа, время выдержки под давлением – 2...10 с в зависимости от сложности и размеров поковки.

Область применения жидкой штамповки определяют, прежде всего, преимущества этого процесса перед литейной технологией и традиционными процессами ОМД, например, горячей объемной штамповкой (ГОШ).

По сравнению с отливками поковки, изготовленные методом жидкой штамповки, обладают более высокими механическими и эксплуатационными свойствами, более высокой точностью размеров, меньшим расходом металла (нет литниковых систем, прибылей и т.д.). В отличие от поковок, полученных традиционными способами ГОШ, жидкой штамповкой получают поковки как с толстыми, так и с тонкими стенками; без перемычек в отверстиях; с меньшим числом переходов; с меньшими затратами на механическую обработку, а также с полным ее отсутствием.

Вместе с тем процесс жидкой штамповки требует больших затрат на инструмент из-за его невысокой стойкости, особенно при обработке сталей.

Производят в основном поковки массой до 10 кг.

Методы жидкой и полужидкой штамповки находят все большее применение в промышленности.

Например, преимущества жидкой штамповки особенно ярко проявляются при изготовлении поршней для двигателей внутреннего сгорания из литейных алюминиевых сплавов – силуминов, т.е. сплавов системы алюминий-кремний (АЛ25, АЛ26, АЛ30, АК12, АК18, АК21 и др.), а также ковких сплавов алюминий-медь (АК4, АК6, АК8 и др.).

Поршень – без преувеличения наиболее ответственная и специфичная деталь в современном двигателе. Он должен быть легким и прочным, способным выдерживать значительные механические нагрузки и тепловые удары, обладать высокой износостойкостью рабочих поверхностей, низким трением. Поршень как бы концентрирует все технические новшества, заложенные в конструкцию мотора.

По сравнению с традиционной технологией литья в кокиль, по которой в настоящее время получают заготовки поршней, метод жидкой штамповки позволяет снизить расход металла на 30...40 % (коэффициент использования металла составляет 90...95 %), измельчить зерно, улучшить механические свойства готовых изделий на 15...20 %, повысить размерную точность и чистоту поверхности, избавиться от дефектов литейного происхождения.

По сравнению с технологией ГОШ этот метод позволяет в 3...4 раза сократить число операций, в 2...2,5 раза снизить усилия применяемого прессового оборудования, а значит, и его стоимость. Кроме того, применение технологии жидкой штамповки позволяет создавать специальный микрорельеф поршней, уменьшить зазор в цилиндре без опасности заклинивания, снизить шумовой эффект, повысить долговечность цилиндропоршневой группы.

Детали, полученные методом жидкой штамповки, можно не подвергать термообработке для повышения твердости, т.е. не требуются дополнительные энергетические затраты.

При реализации технологии жидкой штамповки появляется возможность изготовления композитных поршней (алюминиевый сплав + керамика), что открывает новые перспективы развития двигателестроения, а также позволяет получать высоконагруженные композиционные детали, применяемые в других областях машиностроения.

При получении композитных деталей методом жидкой штамповки в полость пресс-формы помещаются упрочняющие закладные элементы из пористой керамики, керамические вставки (например, алюминий-

кремнеземистые), рис. 3.5, которые пропитываются под давлением жидким металлом, т.е. получают композитное изделие (алюминиевый сплав, армированный керамикой).

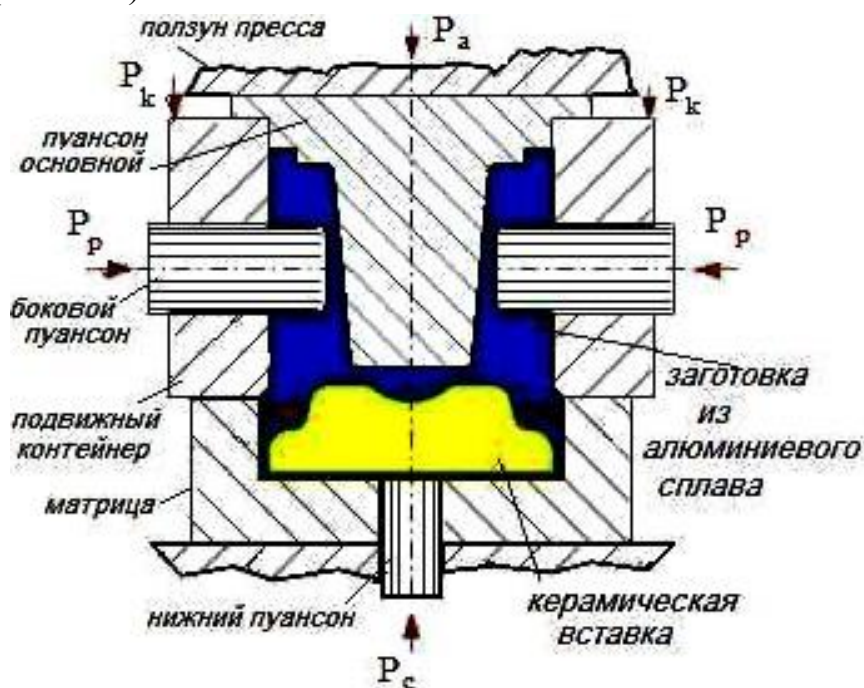


Рисунок 3.5 – Схема жидкой штамповки композитного поршня

Получаемые композитные поршни имеют более высокую прочность, чем аналогичные изделия, полученные жидкой штамповкой без керамического армирования, и тем более высокие ее значения по сравнению с применением технологии литья в кокиль, табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Свойства материала поршней при высоких температурах

Метод изготовления	Температура испытаний, °C	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
Литье в кокиль	300	85	1,0
	400	43	7,5
Жидкая штамповка	300	107	2,7
	400	45	7,1
Жидкая штамповка с керамическим армированием (AK18 + 20 % алюминий-кремнеземистого состава)	300	135	1,0
	400	63	2,8

Новые поршни обеспечивают большой ресурс цилиндра-поршневой группы, сохранение работоспособности в более теплонпряженных условиях работы, позволяют усовершенствовать конструкцию поршня и эффективность работы двигателя.

Одной из наиболее известных в мире фирм, разрабатывающих и производящих современные поршни с использованием технологии жидкой штамповки, в том числе с армированием керамическими волокнами, является немецкая марка *Mahle*. Сегодня фирма *Mahle* выпускает поршневые группы для подавляющего большинства моделей и автомобилей европейского производства – марок «*Mercedes*», *BMW*, «*Volkswagen*», «*Audi*», «*Opel*», «*Renault*», «*Peugeot*», «*Citroen*», ВАЗ, ГАЗ, для двигателей японских машин.

Технология жидкой штамповки используется японской автомобилестроительной фирмой *UBE*, международной группой *T&N*; данная технология также внедряется на предприятиях России (например, на Самарском заводе поршней, КамАЗе, Заволжском моторном заводе и др.), Украины.

Получаемые жидкой штамповкой поршни используются не только в автомобильных двигателях, но и в двигателях всех типов – от маленьких мотоциклетных до мощных, в десятки тысяч киловатт, судовых дизелей.

Другие примеры применения жидкой штамповки:

- диски автомобильных колес из алюминиевого сплава, обладающие более высоким уровнем механических свойств по сравнению с литыми;
- траки для колесно-гусеничных машин из алюминиевых сплавов;
- детали тормозной системы автомашин;
- конструкционные композитные профили на основе высокопрочных алюминиевых сплавов, получаемые жидкой штамповкой с последующим экструдированием, применяемые в высоконагруженных конструкциях авиационной и космической техники, энергомашиностроении, силовых конструкциях резервуаров для агрессивных сред;
- изготовление тонкостенных высокопрочных корпусных изделий сложной пространственной формы из алюминиевых сплавов, например, корпусов приборов ночного видения;
- изготовление мельничных шаров из чугуна;
- получение композиционных материалов и изделий из них.

Некоторые примеры изделий, полученных методом жидкой штамповки, приведены на рис. 3.6.



*a*



*б*

Рисунок 3.6 – Изделия, полученные методом жидкой штамповки:  
*a* – поршни двигателей внутреннего сгорания, компрессоров,  
 пневматических и гидравлических систем; *б* – изделия с повышенными  
 требованиями механической прочности, а также гидро- и пневмоплотности

Перспективным процессом для получения поковок, особенно стальных, позволяющим устранить основной недостаток жидкой штамповки – высокую стоимость оснастки, выполняемой из специальных жаропрочных сталей и сплавов, – является процесс деформирования твердожидкой заготовки. При этом процесс формообразования разделен на два этапа.

На первом этапе расплав заливают в графитовую, керамическую форму или кокиль из жаростойкой стали или сплава, где он «подстуживается» до образования корки по всей периферии, то есть формируется твердо-жидкая заготовка (ТЖЗ), представляющая собой неоднородную композицию, состоящую из закристаллизовавшейся оболочки некоторой толщины (корки) и жидкой сердцевины.

На втором этапе ТЖЗ помещают в штамп и деформируют. Температура поверхностного слоя ТЖЗ соответствует температурному интервалу ГОШ для данного сплава, а температура поверхности раздела твердой оболочки и жидкой сердцевины – температуре солидуса сплава. Скорость продвижения фронта кристаллизации зависит от температуры расплава и интенсивности теплопередачи через корку и кокиль в окружающую среду.

Использование ТЖЗ вместо твердой заготовки позволяет существенно снизить технологические силы обработки в ряде процессов: при изготовлении сортового проката, штамповке в открытых и закрытых штампах, прессовании профилей и ступенчатых валов.

Уменьшение силы штамповки обусловлено тем, что деформируется только закристаллизовавшаяся корка, а жидкая сердцевина заготовки практически без потерь передает давление от инструмента по всему фронту кристаллизации, обеспечивая плотную структуру поковки. При этом температура поверхности ТЖЗ существенно меньше температуры расплава.

Таким образом, благодаря одновременному протеканию процессов кристаллизации и пластической деформации силовые и тепловые нагрузки на инструмент существенно снижаются, что повышает его долговечность.

### **3.3. Использование методов интенсивной пластической деформации при получении заготовок из наноструктурных материалов**

Широкое использование наноструктурных материалов, обладающих уникальными свойствами, рассматриваемых как перспективные конструкционные и функциональные материалы нового поколения металлов и сплавов (см. п. 1.7), невозможно без разработки достаточно эффективных и дешевых способов их массового производства.

К перспективным способам получения металлов и сплавов с наноструктурой относятся, как было указано в п. 1.7, методы интенсивной пла-

стической деформации (ИПД). Эти методы также называют методами деформационного диспергирования.

В основе данных методов лежит формирование наноструктур за счет использования обжатия с большими степенями деформации (со степенями 10 и более) при сравнительно низких температурах (ниже  $0,3 \dots 0,4 T_{пл}$ ). В результате больших пластических деформаций размеры структурных элементов уменьшаются и достигают значений, характерных для наноструктур.

Основными достоинствами методов ИПД являются: возможность получения массивных образцов материала, на которых можно проводить механические испытания; получение наноструктурных материалов с практически беспористой структурой; получение ультрамелкозернистой структуры не только в чистых металлах, но и в промышленных сплавах.

Кроме того, есть еще одно весьма важное преимущество у наноматериалов, полученных методами интенсивной пластической деформации.

Как известно, пластическая деформация может оказывать существенное влияние на микроструктуру и свойства материалов. Например, при интенсивной прокатке, прессовании, волочении происходит измельчение микроструктуры, что приводит к определенному повышению прочностных характеристик материала (наклепу). Однако материалы, подвергнутые деформации этими традиционными методами, обычно обладают пониженной пластичностью, которая является одной из фундаментальных характеристик, необходимых для разработки новых конструкционных материалов.

Как правило, и наноматериалы, получаемые компактированием порошков, быстрой закалкой расплава, см. п. 1.7.2, обладают также низкой пластичностью и, более того, часто бывают хрупкими.

В отличие от этого, материалы, полученные методами ИПД, обладают одновременно необходимым запасом и прочности, и пластичности.

Все указанные обстоятельства привели к тому, что в последние годы использование методов интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных металлов и сплавов стало одним из актуальных направлений современного материаловедения и технологии обработки металлов давлением.

При разработке методов ИПД существует несколько требований для получения объемных наноматериалов:

- ♦ во-первых, важность формирования ультрамелкозернистых структур, имеющих большеугловые границы (границы зерен или кристаллитов),



поскольку именно в этом случае качественно изменяются свойства материалов;

- ♦ во-вторых, формирование наноструктур, однородных по всему объему образца, что необходимо для обеспечения стабильности свойств полученных материалов;

- ♦ в-третьих, образцы не должны иметь механических повреждений или разрушений, несмотря на интенсивное деформирование.

Основная цель данных методов – накопление деформации в заготовках без изменения их формы. Особенность процессов интенсивной пластической деформации состоит в том, что форма заготовки после полного цикла деформации практически совпадает с исходной, что позволяет обрабатывать ее многократно.

К основным методам, основанным на использовании интенсивной пластической деформации, относятся: кручение под высоким давлением, равноканальное угловое прессование, всесторонняя ковка и др., общая сущность которых заключается в многократно производимой пластической деформации сдвига обрабатываемых материалов.

Рассмотрим основные методы интенсивной пластической деформации подробнее.

**Кручение под давлением**, рис.3.7, заключается в измельчении зеренной структуры деформацией кручением с одновременным приложением давления.

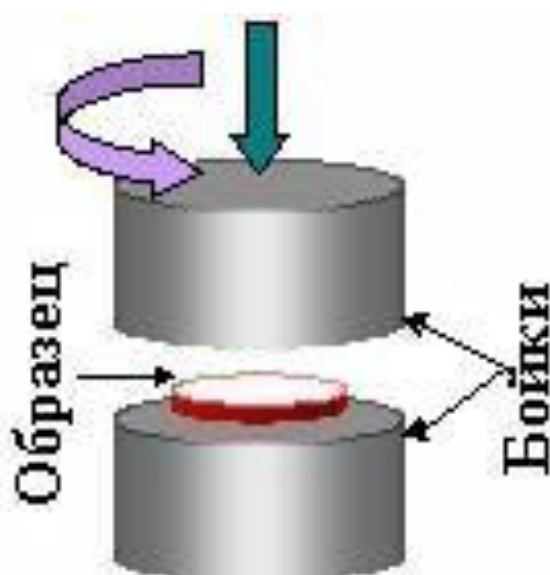


Рисунок 3.7 – Схема метода кручения под давлением

В данном методе образец зажимается бойками с двух сторон и сжимается под приложенным давлением в несколько гигапаскалей. Вращение одного из бойков (пуансона), см. рис. 3.7, за счет сил трения обеспечивает сдвиговую деформацию образца. В ходе реализации данной схемы интенсивной пластической деформации после нескольких оборотов структура материала измельчается и становится практически однородной по радиусу образцов.

Основным недостатком метода является ограничение размеров и формы получаемых заготовок (получают образцы в виде дисков диаметром 10...20 мм и толщиной 0,2...0,5 мм), что затрудняет их исследование и ограничивает практическое применение.

**Равноканальное угловое (РКУ) прессование** является эффективным способом интенсивной пластической деформации массивных образцов и состоит в том, что цилиндрическая или призматическая заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися под углом  $90^\circ$  (или иным), рис. 3.8, т.е. РКУ-прессование обеспечивает многократную (повторную) деформацию сдвига без изменения поперечного сечения образца.

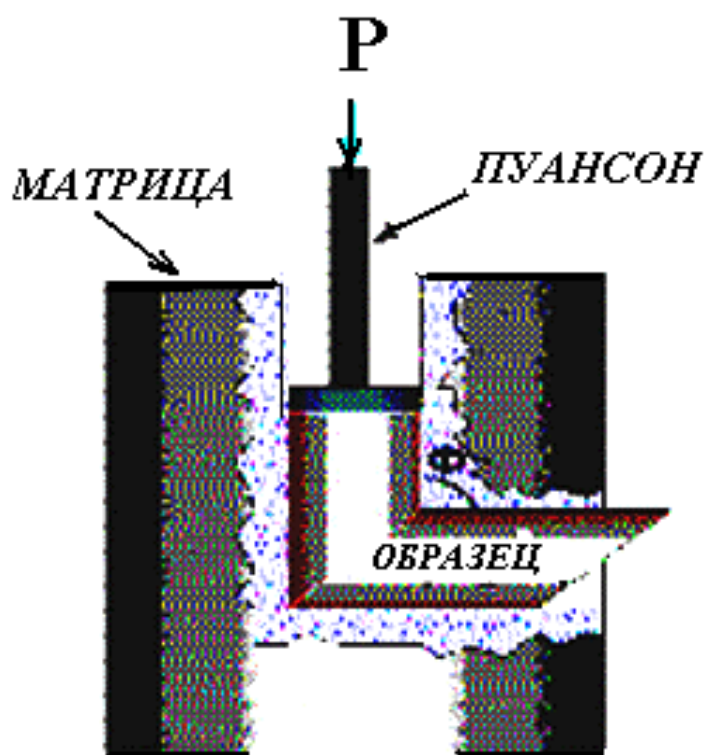


Рисунок 3.8 – Схема равноканального углового прессования

В труднодеформируемых материалах деформация осуществляется при повышенных температурах. Маршруты, число и температурно-временные условия повторных проходов через канал могут варьироваться.

Методом РКУ-прессования измельчение структуры может быть достигнуто относительно легко уже после одного-трех проходов. Однако обеспечение формирования однородных наноразмерных структур (с размером зерна 100 нм и менее) методом РКУ-прессования требует заметно большего числа проходов – до 8 и более.

Метод РКУ-прессования может быть применен как для чистых металлов, в том числе труднодеформируемых – W, Ti, так и сплавов на их основе.

Метод развивается в направлении компьютерного моделирования механики прессования, в частности, напряженно-деформированного состояния материала; увеличении максимального размера заготовок (в настоящий момент используются прутковые заготовки диаметром до 60 мм, длиной до 200 мм); комбинации РКУ-прессования с другими технологиями обработки материалов; изучении фундаментальных аспектов и практического применения данного процесса.

Еще одним из деформационных способов формирования наноструктур в массивных образцах является **всесторонняя ковка**. В данном методе операции свободной ковки повторяются многократно со сменой оси прикладываемого деформирующего усилия.

Такая схема деформации позволяет сохранить форму и размеры заготовки, обеспечив ее интенсивную горячую деформацию, которая обычно сопровождается рекристаллизацией, даже в достаточно хрупких материалах и при сравнительно небольших удельных нагрузках на инструмент.

Методы интенсивной пластической деформации развиваются, появляются новые технологические схемы их реализации: винтовое прессование или винтовая экструзия, многократное прессование со сменой оси деформации – прямое-обратное прессование и др. Эти методы позволяют получать крупногабаритные заготовки из сплавов промышленного применения – медных, алюминиевых, титановых, никелевых; как правило, не требуют специальной оснастки; обеспечивают постоянство формы заготовок при накоплении интенсивных деформаций, являются перспективными для осуществления интенсивной пластической деформации в заготовках из высокопрочных хрупких материалов – керамики, интерметаллидов.

### 3.4. Технологии совмещения процессов ОМД с другими процессами формообразования

Конструирование и технология всегда находятся в противоречивых отношениях: чем выше требования к прочности конструкций, тем труднее обрабатывать элементы этой конструкции; чем больше габаритные размеры и сложнее конфигурация деталей, составляющих конструкцию, тем больше усилий требуется для их обработки, сложнее инструменты и оборудование, дороже их эксплуатация. Решение подобных проблем зачастую невозможно при условии применения одной из наиболее распространенных технологий формообразования – литья, обработки металлов давлением, обработки резанием.

Одним из перспективных решений в этом направлении является совмещение нескольких технологических процессов формообразования в одном процессе, т.е. применение комбинированных технологий.

Примеры подобного сочетания уже были рассмотрены в данном пособии. Например, в п. 2.3 показана возможность совмещения процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и литья; в п. 2.4 рассмотрены возможности сочетания технологии послойного синтеза изделий (*RP*-технологий) и литья; в п. 2.6.1 рассмотрен процесс получения заготовок с помощью технологии, объединяющей непрерывное литье и прокатку; в п. 3.1.2 указаны возможности сочетания процессов сверхпластической формовки и диффузионной сварки; в п. 3.2 представлены возможности жидкой и полужидкой штамповки, объединяющей литье и обработку металлов давлением.

Другие примеры применения комбинированных технологий на базе процессов ОМД рассмотрим ниже.

#### 3.4.1. Ультразвуковая обработка давлением

Достаточно прочные позиции в производстве уже занимает *ультразвуковая обработка давлением*, которая основана на наложении ультразвуковых механических колебаний, т.е. колебаний с частотой 16...50 кГц, на инструмент (или заготовку) в различных процессах ОМД. Наложение

жение ультразвуковых колебаний реализуется при прокатке, ковке, штамповке, волочении, прессовании.

Ультразвуковые колебания (УЗК) в данных видах обработки используются как средство интенсификации основных технологических операций обработки давлением и являются дополнительным источником энергии.

Интенсифицирующее действие ультразвука на процессы обработки металлов давлением связано с изменением прочностных и пластических свойств деформируемого металла (за счет существенного повышения плотности структурных несовершенств – дислокаций, вакансий – в результате действия знакопеременных ультразвуковых деформаций), повышением его температуры (за счет поглощения энергии упругих колебаний), уменьшением сил контактного трения в очаге деформации под действием упругих колебаний.

Применение ультразвуковых колебаний при обработке давлением позволяет повысить стойкость инструмента, улучшить состояние поверхностного слоя заготовок (снизить шероховатость, уменьшить величину остаточных напряжений), обеспечить обработку материалов, деформация которых без УЗК приводит к их разрушению, и уменьшить энергоемкость операций.

Степень воздействия ультразвука на силовые параметры процессов обработки металлов давлением в значительной мере зависит от схемы подведения колебаний в очаг деформации и технологических факторов (скорости процесса, степени деформации и др.).

Источником ультразвуковых механических колебаний, используемых при обработке металлов давлением, является магнитострикционный (или пьезокерамический) преобразователь, преобразующий высокочастотные электрические колебания, вырабатываемые специальными генераторами, в механические колебания той же частоты.

Весьма важным моментом в реализации ультразвуковой обработки давлением является реализация оптимального способа подведения колебаний к очагу деформации. Возможен подвод через обрабатывающий инструмент или через деформируемый металл (заготовку). Первая схема более распространена, т.к. подвод колебаний через заготовку обязывает выполнение определенных требований к ее конфигурации и размерам для работы всей колебательной системы в резонансном режиме. В ряде же случаев выпол-

нение этих требований является технически невозможным, т.к. размеры и форма заготовки меняются в процессе деформации.

Рассмотрим кратко возможности различных процессов ОМД с применением ультразвуковых колебаний.

Достаточно распространены в промышленности процессы листовой штамповки с применением ультразвука. При листовой штамповке (разделительных или формоизменяющих операциях) УЗК вводят в зону деформации с помощью пуансона, матрицы или через оба инструмента.

Использование УЗК при выполнении операций листовой штамповки позволяет снизить напряжения, соответствующие данной степени деформации, повысить пластичность металла заготовки, уменьшить трение в месте деформации, снизить вероятность образования дефектов при штамповке труднодеформируемых материалов. Схема гибки листовой заготовки с применением ультразвуковых колебаний приведена на рис. 3.9. а,

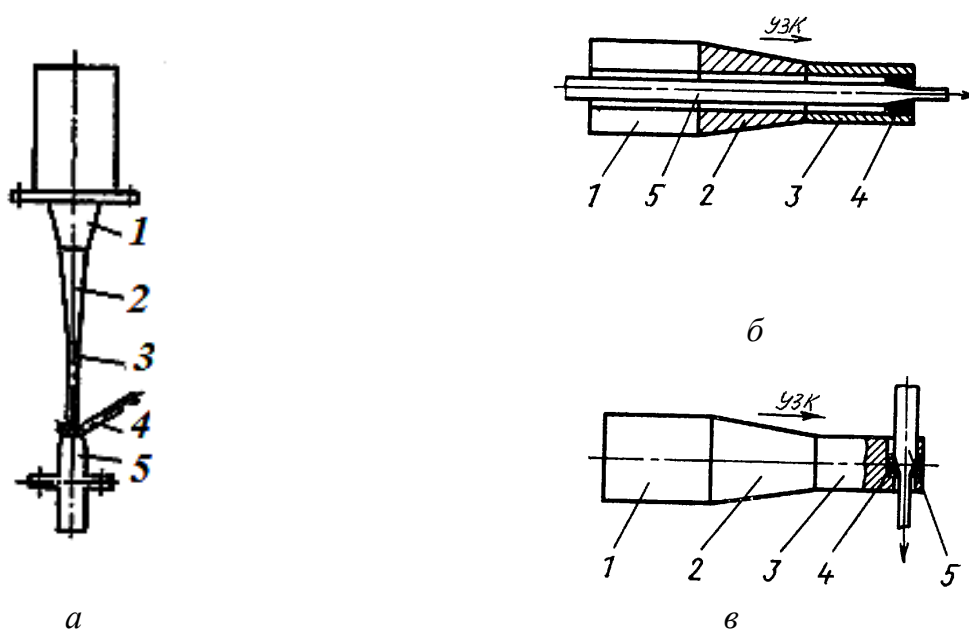


Рисунок 3.9 – Схемы процессов обработки давлением с применением ультразвуковых колебаний:

а – схема гибки листовой заготовки: 1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – волновод; 3 – пуансон; 4 – заготовка; 5 – матрица;

б – схема волочения проволоки (вектор колебательной скорости параллелен оси волочения); в – схема волочения проволоки (вектор колебательной скорости перпендикулярен оси волочения):

1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – концентратор; 3 – волновод; 4 – волока; 5 – проволока

При волочении УЗК уменьшают среднее усилие волочения за счет уменьшения сил контактного трения, формирования знакопеременных напряжений, снижения предела текучести металла, разупрочнения, дробного характера деформации.

При волочении проволоки УЗК вводят, как правило, через волочильный инструмент (волоку, матрицу), рис. 3.9, б, в; при волочении труб – через волочильный инструмент, оправку, комбинированным способом.

Аналогично листовой штамповке, преимущества использования УЗК при волочении существенны: увеличивается степень обжата за один проход при одновременном уменьшении усилия волочения, улучшается состояние поверхностного слоя заготовки.

Ультразвуковое волочение труб (из углеродистых, коррозионностойких сталей, сплавов никеля, бериллиевой бронзы, латуни, алюминия и др.) также достаточно широко распространено в промышленности. Применение энергии упругих колебаний позволяет получать готовые трубы высокого качества и большой геометрической точности, уменьшить себестоимость изделий и расход времени на их изготовление.

Актуально применение ультразвука при волочении тонкой и «микронной» проволоки из меди, алюминия, константана (сплава меди с никелем и марганцем) и никелевых сплавов.

В промышленных масштабах освоено ультразвуковое волочение профилей сложных поперечных сечений, деталей из труднодеформируемых сталей и сплавов.

При прессовании наиболее эффективной является схема при подведении УЗК к матрице и пуансону одновременно. Эффект наложения УЗК проявляется в снижении силы прессования, уменьшении неравномерности деформации. У деталей, полученных прессованием с УЗК, повышается предел прочности, снижается шероховатость поверхностей, контактирующих с матрицей и пуансоном.

### **3.4.2. Деформирующее резание**

К числу перспективных технологий относится также новый, сравнительно недавно разработанный российскими учеными (МГТУ им. Н.Э. Баумана) метод формообразования, основой которого являются одновременно как

процесс резания, так и процесс пластического деформирования. Метод получил название *«деформирующее резание»*.

Как известно, обработка материалов резанием (ОМР) основана на разрушении заготовки с ее разделением на части и всегда сопровождается образованием новых поверхностей. Обработка материалов давлением (ОМД) основана на пластической деформации заготовки без ее разрушения и нарушения сплошности. В то же время определить четкую грань между обработкой резанием и обработкой давлением достаточно сложно, поскольку и в ОМР, и в ОМД основой формообразующего процесса являются пластические деформации, только при резании эти деформации доведены до разрушения.

В методе деформирующего резания одновременно реализуются оба процесса – частичное разрушение (подрезание) поверхностного слоя заготовки резанием и пластическое деформирование подрезанного слоя.

Особенность процесса деформирующего резания (ДР) связана с конструкцией применяемого инструмента – резца. Так, при работе обычного токарного резца припуск (т.е. слой материала заготовки, который снимается в процессе ее обработки с целью получения окончательной формы, необходимых размеров и шероховатости поверхности детали при наименьших затратах материала) разрушается по линиям проекций как главной, так и вспомогательной режущих кромок, рис. 3.10.

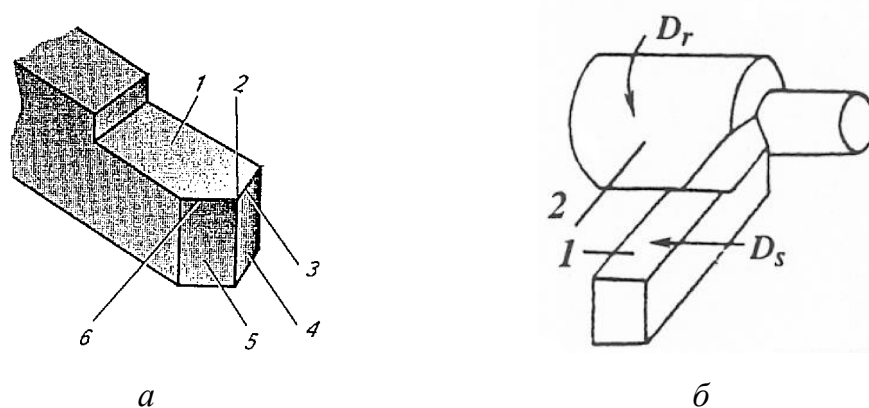


Рисунок 3.10 – Процесс резания:

- а – элементы токарного резца: 1 – передняя поверхность, по которой сходит стружка; 2 – вершина резца (точка пересечения режущих кромок); 3 – вспомогательная режущая кромка; 4 – вспомогательная задняя поверхность; 5 – главная задняя поверхность; 6 – главная режущая кромка, которая осуществляет основную работу резания;
- б – схема процесса резания: 1 – инструмент (резец); 2 – заготовка;  $D_r$  – главное движение;  $D_s$  – движение подачи



Основное отличие резца для ДР состоит в том, что инструмент имеет вспомогательную кромку, не участвующую в процессе резания. Это достигается назначением определенных значений передних углов на вспомогательной кромке (менее  $50^\circ$ ). При работе таким инструментом материал разрушается по линии проекции главной режущей кромки, а по линии проекции вспомогательной кромки разрушения не происходит. Стружка своей узкой стороной остается прикрепленной к детали, рис. 3.11.

Сечение подрезанного слоя сохраняет механическую связь с обрабатываемой заготовкой, что позволяет направленно деформировать подрезанный слой с образованием ребра. Совокупность ребер формирует на поверхности детали развитый макрорельеф в виде оребрения.

В качестве примера на рис. 3.12 представлена «оребренная» труба, у которой площадь поверхности после обработки ДР увеличивается в 14 раз.

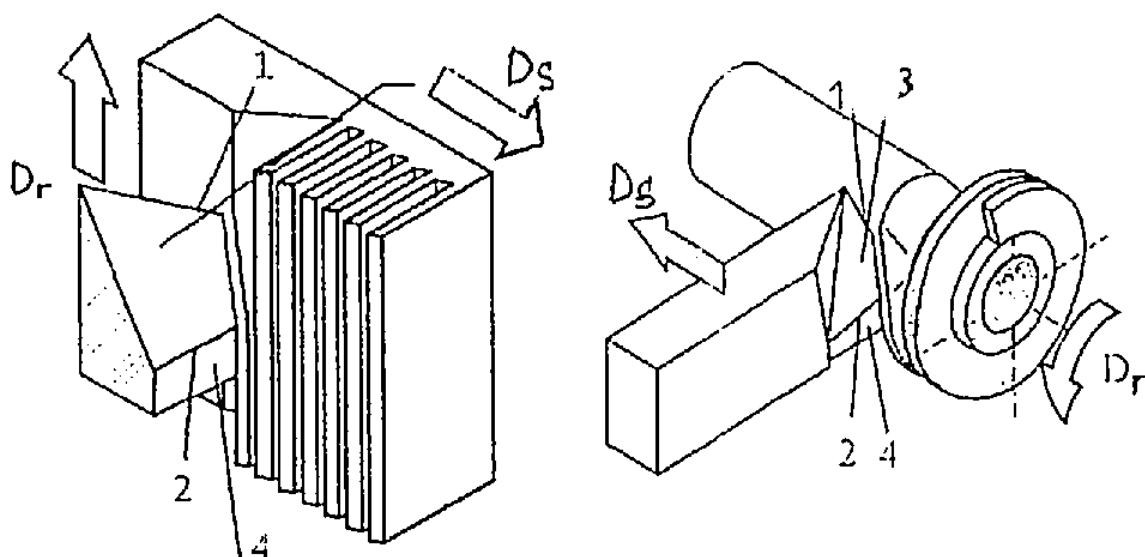


Рисунок 3.11 – Схема формообразования макрорельефа методом деформирующего резания:

1 – главная (режущая) кромка; 2 – вспомогательная (деформирующая) кромка;  
3 и 4 – передняя и задняя вспомогательная поверхности

Таким образом, при проведении деформирующего резания меняется цель процесса. Если для традиционной обработки резанием целью операции является получение заданной формы, точности и качества поверхности детали, то для ДР цель процесса – обеспечение заданной формы, точности и качества рельефа, получаемого на поверхности детали в виде совокупности неотделившихся от заготовки подрезанных слоев, по сути дела – стружки.

На обрабатываемость материалов деформирующим резанием существенное влияние оказывает пластичность и твердость материалов. Твердость материалов не должна превышать  $220HB$ , для обработки материалов с относительным удлинением  $\delta < 18\%$  необходим дополнительный подогрев заготовки или зоны обработки.

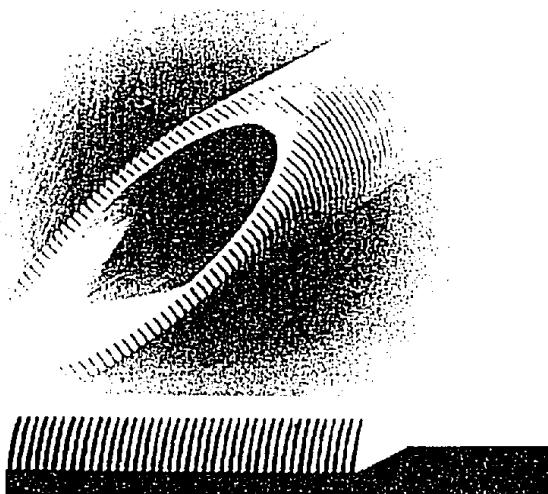


Рисунок 3.12 – Оребренная труба и характерный профиль оребрения, получаемого ДР (шаг оребрения 0,25 мм)

Реализуется деформирующее резание на обычных металлорежущих станках, в том числе с ЧПУ: при обработке цилиндрических и торцовых поверхностей – на токарных, при обработке плоскостей – на фрезерных или строгальных.

К достоинствам технологии, кроме простоты инструмента и возможности использования серийного оборудования, относятся также безотходность, производительность, экологическая безопасность и, главное, широкие перспективы практического использования.

Рассмотрим основные перспективные области применения новой технологии.

▼ Развитые поверхности, получаемые методом ДР, в первую очередь, перспективны для изготовления деталей теплообменников из меди и ее сплавов, рис. 3.13, поскольку увеличение их площади поверхности интенсифицирует теплообменные процессы и позволяет снижать габариты и вес теплообменной аппаратуры.

Сокращение металлоемкости деталей теплообменных аппаратов чре-

звычайно актуально, поскольку расход цветных металлов и сплавов на изготовление этих деталей очень велик. Например, только для изготовления теплообменников холодильных и кондиционирующих установок, работающих на принципе фазовых переходов, используется около 6 % мирового потребления меди, что составляет около 500 000 т в год.

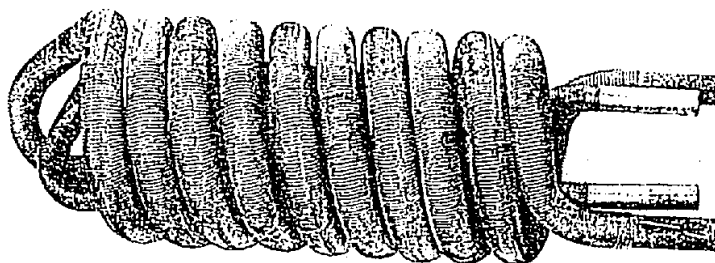


Рисунок 3.13 – Винтовой теплообменник из оребренной трубы

▼ Известно, насколько велика сегодня роль износостойких покрытий, наносимых на поверхности режущих инструментов, деталей машин. Принципиально новый подход при создании износостойких покрытий большой толщины с управляемой структурой и свойствами реализуется благодаря использованию деформационного резания.

При этом используется макрорельеф, формируемый методом ДР, при его последующем диффузионном легировании. Основой при получении покрытий является макрорельеф с глубокими и узкими межреберными зазорами, шириной от нуля до 150 мкм. Межреберные зазоры при последующей химико-термической обработке позволяют ускорить в десятки раз проникновение легирующих элементов вглубь поверхности, после чего происходит твердотельное диффузионное легирование боковых сторон ребер. Становится возможным получать диффузионные покрытия большой толщины (до 1,5 мм), поскольку толщина покрытия определяется глубиной макрорельефа; варьировать толщину диффузионного слоя за счет изменения толщины ребер, ширины межреберного зазора.

Композиционные покрытия с наличием тонкой прослойки исходного композиционного материала в сердцевине ребра способны работать как упрочняющие при динамических нагрузках, поскольку неупрочненная сердцевина ребра выполняет роль пластичной матрицы для твердых износостойких слоев боковых сторон ребра.

При заполнении межреберных зазоров твердыми смазками (на основе дисульфида молибдена, фторопласта, антифрикционных сплавов)

обеспечивается получение самосмазывающихся покрытий, т.к. слои твердой смазки, выходящие на поверхность трения, обеспечивают ее равномерное распределение по площади контакта, а также постоянное ее наличие, даже по мере износа покрытия.

▼ Поскольку при деформирующем резании происходит увеличение размеров изделия после обработки, предлагается его использование для восстановления размеров изношенных деталей машин как самостоятельный технологический прием.

Размеры детали могут увеличиться до  $0,8 \dots 1,0$  мм на диаметр за счет перераспределения материала поверхностного слоя с созданием открытой регулярной пористости в виде узких глубоких канавок. При этом материал ребер, как и обычной стружки, упрочнен и имеет твердость и прочность в  $1,5 \dots 2$  раза большую по сравнению с основным материалом.

При восстановлении изношенных поверхностей с большими величинами износа целесообразно применение ремонтных составов на основе металло- или керамиконаполненных полимерных компаундов.

К другим возможным областям эффективного применения деформационного резания относятся:

▼ охлаждающие или термостабилизирующие пластины с внутренними подповерхностными микроканалами для элементов радиоэлектронной аппаратуры;

▼ получение макрорельефа, обладающего капиллярным эффектом, при изготовлении тепловых труб;

▼ получение резьбы на тонкостенных трубах из цветных металлов;

▼ изготовление щелевых фильтрующих структур-сеток с квадратной и ромбической ячейкой из металлических (медных, алюминиевых, титановых, серебряных) и полимерных (фторопластовых, полиэтиленовых, полипропиленовых) тонколистовых заготовок (толщиной  $0,2 \dots 0,5$  мм), обрабатываемых ДР с двух сторон, для фильтрации различных сред, например, в системе водоочистки, а также дренажа, аэрации жидкостей, сепарации порошков;

▼ деформационное упрочнение посредством оребрения с нулевой шириной канавки;

▼ подготовка поверхностей под последующее нанесение газотермических покрытий, склеивание, диффузионную сварку и пайку.

### **3.5. Технико-экономические показатели способов ОМД и критерии выбора рационального способа**

#### **3.5.1. Конструктивно-технологические признаки детали, определяющие технологию ее получения методом ОМД**

Уже при проектировании детали конструктор должен представлять способ ее изготовления, только в этом случае конструкция будет отвечать требованиям технологичности. Выбор способа основывается на большом числе конструктивно-технологических признаков детали и технико-экономических показателей видов и способов обработки металлов давлением.

Конструктивно-технологическими признаками детали, определяющими технологию изготовления обработкой давлением, являются: форма, масса, габаритные размеры, свойства материала и тип производства.

*По форме* детали, получаемые методом пластического формоизменения, укрупненно можно отнести к трем основным группам: детали, имеющие определенный профиль поперечного сечения по длине, существенно превышающей размеры сечения; детали в виде оболочек постоянной или незначительно отличающейся толщины; объемные детали.

При выборе конкретного способа могут учитываться различные конструктивные признаки детали: опорные внешние и внутренние очертания, соотношения главных размеров, площадей поперечного сечения и др.

*Масса и габаритные размеры* детали определяют, прежде всего, температурный режим обработки давлением. С их увеличением преобладающим становится горячее деформирование, при котором обеспечивается меньшее давление на инструмент и меньшая сила, необходимая для деформирования. Поковки диаметром более 150 ... 200 мм получают, как правило, горячим деформированием.

*Свойствами материала*, определяющими выбор способа обработки давлением, являются его технологическая пластичность и сопротивление деформированию. Технологическая пластичность, т.е. способность материала к пластическому формоизменению при конкретной схеме и условиях деформирования, особенно строго регламентируется в условиях применения холодной обработки давлением.

Ввиду пониженной технологической пластичности высоколегированных сталей и труднодеформируемых сплавов их предпочтительно де-

формировать такими способами, при которых значительно снижаются растягивающие напряжения. Например, при ковке протяжку целесообразно выполнять в вырезных бойках, при штамповке предпочтительнее применение закрытых штампов, в которых схема неравномерного всестороннего сжатия проявляется полнее и в большей степени способствует повышению пластичности, чем при штамповке в открытых штампах.

Высоколегированные стали склонны к интенсивному упрочнению, поэтому для их горячего деформирования целесообразнее использовать способы, осуществляемые на прессах, а не на молотах. Ввиду меньшей скорости деформирования на прессах разупрочняющие процессы (возврат и рекристаллизация) успевают произойти полнее, и упрочнение снижается.

Малопластичные алюминиевые (АК8, В93 и др.), магниевые (МА8), титановые сплавы также предпочтительно ковать и штамповать на прессах, так как у них пластичность снижается при высоких скоростях деформирования. При этом для уменьшения остывания металла и повышения равномерности деформации штампы подогревают до температуры 200 ... 400 °С. Поковки из некоторых труднодеформируемых сплавов получают изотермической штамповкой.

Заготовки, имеющие литую структуру, обладают, как правило, меньшей пластичностью, чем уже деформированный металл, что необходимо учитывать при выборе способа деформирования. Например, предварительно деформированные прутки из алюминиевых сплавов (АК5, АК6) можно подвергать ковке, тогда как слитки этих сплавов при ковке разрушаются.

**Тип производства** может оказывать решающее влияние на выбор способа получения поковок, так как в условиях крупносерийного и массового производства рентабельны способы деформирования с использованием специальной технологической оснастки. С уменьшением количества одинаковых деталей может окупаться более простая и дешевая оснастка. В мелкосерийном и единичном производстве применяют ковку с использованием универсального инструмента. При этом поковка имеет припуски и напуски большие, чем при штамповке.

На основе анализа формы детали, ее массы, свойств материала и типа производства могут быть предварительно выбраны способы производства. На следующем этапе необходима проверка по условиям деформации без разрушения. Для этого можно использовать теоретический анализ, мо-

делирование процесса деформирования, сравнение количественных параметров деформации с экспериментально найденными предельными значениями. На третьем этапе проводят конструкторскую проработку изделия для улучшения его технологичности.

### 3.5.2. Основные технико-экономические показатели процессов ОМД

Окончательный выбор наиболее рационального способа изготовления поковки может быть сделан только на основе анализа технико-экономических показателей процессов их изготовления. При этом следует учитывать специфические особенности обработки давлением: высокую металлоемкость – затраты на металл достигают 60...80 % себестоимости поковки; высокую стоимость штамповой оснастки – затраты на оснастку составляют 10... 15 % себестоимости поковки; значительные энергоемкость и стоимость основного технологического оборудования.

В соответствии с этим основными технико-экономическими показателями при выборе способа получения поковки являются показатели эффективности использования металла: коэффициент использования металла  $k_u$  и коэффициент точности поковки  $k_n$ .

Коэффициент использования металла оценивают как отношение массы готовой детали к нормативным затратам материала на заготовку (при ковке и объемной штамповке исходной является заготовка, поступающая на операцию нагрева; при листовой штамповке – полоса или лента, поступающая на операцию штамповки).

Величина  $k_u$  в разных видах обработки давлением изменяется в широких пределах: при ковке  $k_u \sim 0,35$ ; при горячей объемной штамповке  $k_u \sim 0,5$ ; при листовой  $k_u \sim 0,65$ ; при холодной объемной штамповке может достигать 0,8 и выше.

Коэффициент точности поковки  $k_n$  определяют как отношение массы готовой детали к массе поковки, из которой ее изготавливают. Таким образом,  $k_n$  характеризует степень приближения формы и размеров поковки к форме и размерам детали, т.е. объем последующей механической обработки.

Коэффициенты  $k_n$  и  $k_u$  не всегда дают однозначную оценку эффективности анализируемых процессов ОМД, т.к. без учета программы выпуска и затрат на оснастку, трудоемкости и других факторов нельзя дать достоверный ответ, какой из способов получения поковки эффективнее.

Поэтому при анализе технико-экономических показателей рассматривают, кроме натуральных ( $k_n$  и  $k_{II}$ ), и стоимостные показатели, в частности, себестоимость детали, которая включает стоимость поковки и ее механической обработки. Отходы при черновой механической обработке – результат больших припусков и напусков в поковке, и чем позже по ходу технологического процесса металл удаляется в отход, тем больше относительные стоимостные потери на единицу массы металла. Снижение себестоимости детали в наибольшей степени достигается при увеличении коэффициента точности поковки  $k_n$ .

Развитие ОМД определяется, главным образом, расширением применения способов с высокими технико-экономическими показателями. Более высокие значения коэффициентов использования металла и точности поковки достигаются в процессах штамповки в закрытых штампах с несколькими плоскостями разреза; при горячем и холодном выдавливании, в процессах поперечно-клиновой прокатки.

Увеличение коэффициента использования металла, внедрение ресурсосберегающих технологий связаны с увеличением затрат на оснастку и оборудование, которые окупаются при достаточной серийности выпуска детали.

Повышение серийности на базе специализации производства облегчает применение средств автоматизации, повышающих производительность и уменьшающих трудоемкость. Такие средства автоматизации, как роторные и поточные автоматические линии, применяются в массовом производстве. Для достижения высокой производительности и низкой себестоимости изготовления изделий серийного выпуска создаются гибкие автоматические модули и участки, позволяющие на одном оборудовании производить многономенклатурную продукцию.

### **3.6. Украинский рынок готового проката черных металлов**

#### **3.6.1. Производство проката черных металлов в Украине**

Прокатное производство, являющееся основной технологией обработки металлов давлением, составляет важную часть горно-металлургического комплекса Украины. В составе прокатного производства Украины – 12 блюмингов и слябингов, 42 сортовых и специальных стана, 19 листовых станов, 43



стана горячей прокатки труб и трубосварочных стана, станы холодной прокатки труб, колесопрокатные, кольцепрокатные и осепрокатные станы.

Суммарное производство готового проката черных металлов в Украине в настоящее время находится на уровне 25...26 млн. тонн в год.

Крупнейшими производителями *листового проката* являются следующие предприятия отрасли: ОАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», ОАО «Запорожский металлургический комбинат «Запорожсталь», ОАО «Металлургический комбинат «Азовсталь», ОАО «Алчевский металлургический комбинат».

Крупнейшим производителем *сортового проката* в Украине является ОАО «Миттал Стил Кривой Рог».

Рассмотрим специализацию некоторых крупных предприятий.

**ОАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича»** специализируется на производстве толстолистового проката из конструкционной углеродистой стали (толщиной 9...160 мм), белой жести (толщиной 0,5...1,5 мм), стальной ленты, листа из биметаллов. Также на предприятии производят трубы стальные электросварные (диаметром 21,3...114 мм), трубы стальные бесшовные (219...325 мм).

Комбинат является поставщиком стального листа для судостроения, в том числе для кораблей торгового, ледокольного и военного флота. Данная продукция сертифицирована авторитетными международными классификационными центрами.

Комбинат не имеет достаточного рынка сбыта в Украине, доля экспортных поставок достигает 85 %. Продукция комбината экспортируется в более, чем 50 стран мира.

**ОАО «Миттал Стил Кривой Рог»** специализируется на производстве длинномерного стального проката, в частности, арматурных гладких и периодических профилей, катанки.

До 90 % продукции комбинат поставяет на экспорт.

**ОАО «Запорожский металлургический комбинат «Запорожсталь»** специализируется на производстве горяче- и холоднокатаного листового проката толщиной 0,5...0,6 мм из углеродистых и легированных, в том числе нержавеющей, сталей.

«Запорожсталь» является единственным в Украине производителем холоднокатаного листа из углеродистой стали со способностью к особо сложной вытяжке, жести (толщиной 0,2...0,45 мм) для пищевой промышленности, не-

которых видов холоднокатаного проката для инструментального производства, а также монопольным производителем гнутых профилей.

Для обеспечения различных отраслей промышленности Украины комбинатом в последние годы освоено более 70 видов горячекатаного и холоднокатаного проката из углеродистых, легированных конструкционных и инструментальных сталей и более 30 типоразмеров новых экономичных холодногнутых профилей.

«Запорожсталь» также выпускает широкий ассортимент товаров народного потребления.

**ОАО «Металлургический комбинат «Азовсталь»** является монополистом на рынке Украины по нескольким видам металлопроката, в частности, по производству железнодорожных рельсов (82 % украинского рынка), рельсовых скреплений, судопроката (толстолистого проката), мелющих шаров.

Доля экспорта в объеме реализуемой продукции составляет до 50 %.

Основными потребителями продукции комбината в Украине являются машиностроительные предприятия.

**ОАО «Алчевский металлургический комбинат»** занимает монопольное положение по производству толстого листа из нержавеющей стали и сталей специального назначения. Кроме того, предприятием производятся рельсы, специальные профили, шары мелющие и дробь стальная, различные виды сортового проката.

**ОАО «Днепропеталь»** специализируется на производстве высококачественного сортового проката из инструментальных и специальных сталей и сплавов, в том числе нержавеющей, жаропрочных, быстрорежущих, подшипниковых и т.д.

Доля данного предприятия в производстве сортового проката и трубных заготовок из нержавеющей стали составляет более 80 % украинского рынка.

Вклад различных металлургических комбинатов в общее производство листового проката в Украине показан на рис. 3.14.

Из готового проката черных металлов, производимого на украинских предприятиях, полуфабрикаты и плоский прокат (горяче- и холоднокатанный) в основном идет на экспорт, рис. 3.15. Большая часть сортового проката предназначена для внутреннего потребления.

Как следует из рис. 3.15, экспорт проката из Украины имеет положительную динамику. В структуре экспорта преобладают полуфабрикаты (слябы и блюмы), мировые цены на которые держатся на стабильно высоком уровне.

Экспорт сортового проката остается стабильно низким, хотя и с некоторой динамикой роста. Это объясняется тем, что львиная доля сортового проката является неконкурентоспособной на мировом рынке.

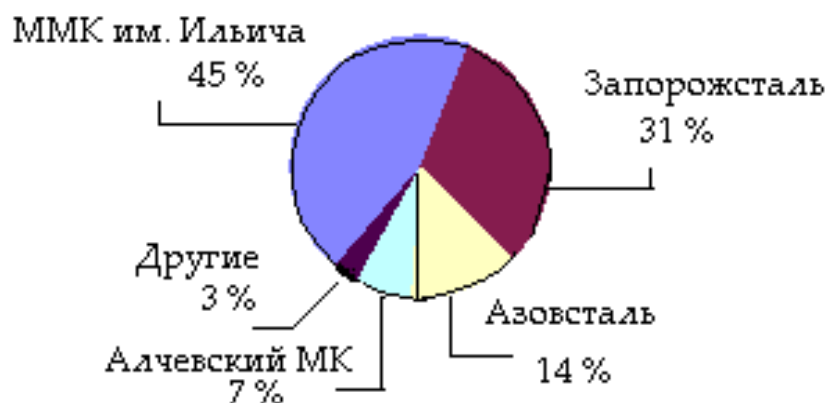


Рисунок 3.14– Структура среднегодовых объемов производства листового проката в Украине

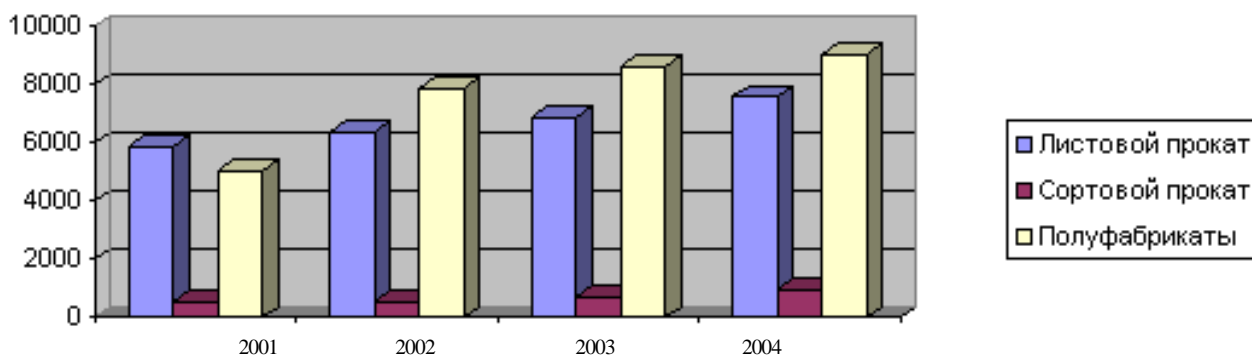


Рисунок 3.15 – Динамика экспорта основных видов готового проката черных металлов из Украины, тыс. тонн

В последние годы значительно увеличился экспорт продукции в страны Азиатско-Тихоокеанского региона и на Ближний Восток, в то время как экспорт в страны ЕС и СНГ снизился. Например, структура экспорта Запорожского металлургического комбината «Запорожсталь» такова: Китай – 36,4 %,

Турция – 19,4 %, Тунис – 12,6 %, Сирия – 7,5 %, Эфиопия – 2,8 %, Израиль – 5,3 %, Польша – 3,5 %, Алжир – 3,4 %.

Среди импортируемой в Украину продукции (в основном, из России) первые позиции занимают полуфабрикаты, некоторые виды проката из углеродистой стали, из качественных легированных, в том числе нержавеющей, сталей, например, лист с различными видами покрытий. Структура импорта обусловлена тем, что в Украине недостаточно развито производство качественного проката.

При оценке перспектив производства проката в Украине необходимо учитывать следующие факторы:

- ♦ зависимость производства готового проката в Украине от внешне-экономической конъюнктуры;
- ♦ мировую тенденцию к снижению производства металлопродукции;
- ♦ нестабильность мировых рынков металлов, характеризующихся частичным закрытием национальных рынков для импортной продукции;
- ♦ износ и малую степень обновляемости основных производственных фондов, что препятствует внедрению передовых технологий и расширению сортамента производимой продукции.

Согласно «Национальной программе развития и реформирования горно-металлургического комплекса Украины на период до 2010 года» и прогнозам ведущих специалистов, предполагается, что производство готового проката черных металлов к 2010 г. будет на уровне 27...28 млн. тонн. Незначительное увеличение по сравнению с уровнем сегодняшних объемов – на 6 % – связано с общей тенденцией спада в мировой металлургии.

Экспортные поставки планируются на уровне 14,5 млн. тонн (уменьшение на 38 % по сравнению с уровнем 2001 г.), внутреннее потребление – на уровне 12,5 млн. тонн (увеличение по сравнению с 2001 на 40 %), импорт – на уровне 0,5...1 млн. тонн (увеличение на 4...5 % по сравнению с 2001 г.).

Предполагается также повышение качества сортового проката, увеличение доли производимого проката из легированных сталей, сертификация продукции металлургических комбинатов по международным стандартам.

### **3.6.2. Потребление готового проката черных металлов в Украине**

Основным потребителем проката на внутреннем рынке Украины являются предприятия черной металлургии (прежде всего, трубные и метизные производства) – 56 % проката, выпускаемого в стране, рис. 3.16.

Именно производство труб будет в ближайшие годы определять уровень спроса готового проката в данной отрасли.

В 2006 г. доля трубных предприятий Украины составила 33 % всего объема потребляемого проката.

В соответствии с «Национальной программой развития и реформирования горно-металлургического комплекса Украины на период до 2010 года» потребление готового проката в трубном производстве составит 2100...2200 тыс. тонн.

Флагманом трубной отрасли Украины является ОАО «Харьковский трубный завод», ориентированный на производство труб большого диаметра для нужд нефтегазовых компаний.

К основным производителям труб в Украине относятся также ОАО «Нижнеднепровский трубопрокатный завод», ЗАО «Никопольский завод бесшовных труб «Нико-тьюб», ОАО «Днепропетровский трубный завод» и др.

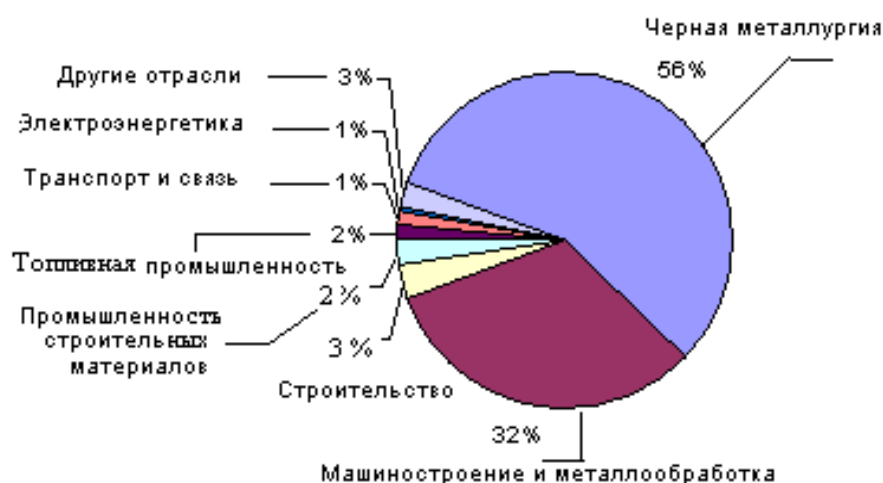


Рисунок 3.16 – Структура потребления готового проката по отраслям промышленности

На втором месте по объемам потребления проката находится машиностроение (32 %), см. рис. 3.16.

Наиболее динамично развивающимся сегментом машиностроительной отрасли Украины является производство машин для агропромышлен-

ного комплекса. Производственный потенциал тракторного и сельскохозяйственного машиностроения насчитывает более 1000 различных предприятий, производящих 2,5 тыс. наименований техники. При этом высокий уровень изношенности сельскохозяйственной техники, необходимость ее модернизации потребуют в ближайшие годы увеличения объема потребляемого проката. По оценкам специалистов, в 2010 году объем потребляемого проката в данной подотрасли увеличится до 1100 тыс. тонн в год (для сравнения – потребление проката в 2005 г. составило 660 тыс. тонн).

Достаточно высок уровень потребляемого проката в другой области машиностроительного комплекса – производстве машин для нужд горно-металлургического комплекса. Основные предприятия данного сектора машиностроения – ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод», производящий шахтное оборудование и оборудование для предприятий черной металлургии, и ОАО «Днепротяжмаш», который выпускает прокатное, дробильное, доменное и сталеплавильное оборудование.

Емким рынком для металлургов также является производство металлургических изделий железнодорожного сортамента.

Предприятия автомобилестроения Украины потребляют лишь незначительные объемы проката (до 470 тыс. тонн), что связано с тем, что характерной чертой национального автомобилестроения является переход большинства предприятий на крупноузловую сборку автомобилей из зарубежных комплектующих. В связи с этим, а также с учетом практического отсутствия в Украине производства автолиста предполагается, что автомобилестроение не увеличит в обозримом будущем свою долю в структуре потребления украинского проката черных металлов.

Третьим по величине потребителем готового проката на внутреннем рынке Украины является строительная отрасль и промышленность строительных материалов (5 % от общего объема потребления). Прогноз потребления готового металлопроката на период до 2010 г. основывается на ожидаемых темпах роста объема строительства, в первую очередь, жилищного. Ожидаемый уровень потребления проката в строительстве до 2010 г. составляет 1800 тыс. тонн.

Важным рынком для металлургов является государственная железнодорожная компания «Укрзалізниця» – монополист на рынке железно-

рожных перевозок. С увеличением спроса на грузовые и пассажирские перевозки и одновременно износом подвижного состава возникла острая необходимость в скорейшей модернизации данного направления машиностроения, что, естественно, приведет к увеличению спроса на продукцию прокатного производства. Крупнейшие предприятия данного направления – ОАО «Лугансктепловоз», ОАО «Крюковский вагоностроительный завод», ОАО «Старокраматорский машиностроительный завод».

Потребление проката в судостроении до 2010 г., согласно Программе развития водного транспорта Украины, может составить в 2010 г. 180 тыс. тонн в год.

За счет планируемого обновления и технической модернизации предприятий химической и нефтехимической отрасли Украины ожидается увеличение потребления металлопроката в 2010 г. до 180 тыс. тонн (в 4,5 раза больше, чем в 2001 г.).

### **Вопросы для самостоятельного контроля**

1. Что понимают под сверхпластичностью?
2. Каковы основные типы сверхпластичности?
3. В чем суть структурной сверхпластичности и каковы условия ее реализации?
4. Что такое «сверхпластичность превращения»?
5. Назовите основные области применения эффекта сверхпластичности.
6. В чем особенность высокоскоростной и низкотемпературной сверхпластичности?
7. Что понимают под жидкой штамповкой?
8. Каковы схемы реализации технологического процесса жидкой штамповки?
9. В чем преимущества жидкой штамповки перед литейной технологией и традиционными процессами ОМД?
10. Каковы области практического применения жидкой штамповки?
11. В чем сущность полужидкой штамповки, где она применяется?
12. В чем особенность технологии получения композитных деталей

методом жидкой штамповки?

13. Какие методы интенсивной пластической деформации применяют для получения массивных наноструктурных заготовок и в чем их сущность?

14. В чем особенность пластической деформации наноструктурных материалов?

15. Какие Вы знаете процессы совмещения ОМД с другими технологиями формообразования?

16. Как реализуется ультразвуковая обработка давлением?

17. В чем преимущество ультразвуковой обработки давлением перед традиционными методами ОМД?

18. В чем состоит метод деформирующего резания?

19. В чем отличие деформирующего резания от традиционных процессов резания?

20. Какие области применения являются перспективными для деформирующего резания?

21. Назовите основные конструктивно-технологические признаки детали, определяющие выбор технологии ОМД для ее получения.

22. Какие характеристики относят к основным технико-экономическим показателям процессов ОМД?

23. Какие предприятия относятся к крупнейшим производителям проката в Украине, на каком виде продукции они специализируются?

24. Какова структура экспорта украинского проката?

25. Каковы перспективы развития прокатного производства в Украине?



## **4. СВАРКА - ВЫСОКОИННОВАЦИОННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОМЫШЛЕННОСТИ XXI ВЕКА**

### **4.1. Состояние и перспективы развития мирового сварочного производства**

Без преувеличения можно сказать, что сегодня, в начале III тысячелетия, сварка является одним из ведущих технологических процессов создания материальной основы современной цивилизации. Сварка и родственные ей технологии (резка, наплавка, пайка, напыление, склеивание) по праву отнесены к высокоинновационным технологическим процессам материального производства. С использованием этих технологий производится более половины валового национального продукта промышленно развитых стран. До 2/3 мирового потребления стального проката идет на производство сварных конструкций и сооружений.

Современное сварочное производство – одна из наукоемких отраслей мировой экономики, имеющая достаточно устойчивые темпы развития и постоянно расширяющуюся сферу применения в создании эффективных сварных конструкций. Непрерывный рост наукоемкости продукции сварочного производства, естественно, способствует повышению ее качества, эффективности и конкурентоспособности.

Область применения сварочных процессов поистине не имеет пределов. Сварке подвергаются практически любые металлы и неметаллы в любых условиях – на Земле, в морских глубинах и в космосе. Свариваются корпуса гигантских супертанкеров и сетчатка человеческого глаза, миниатюрные детали полупроводниковых приборов и кости человека при хирургических операциях. Такие конструкции современных машин и сооружений, как, например, космические ракеты, подводные лодки, газо- и нефтепроводы, изготовить без помощи сварки вообще невозможно.

Во многих случаях сварка является единственно возможным способом создания неразъемных соединений конструкционных материалов и получения заготовок, максимально приближенных по геометрии к оптимальной форме готовой детали или конструкции.

Развитие техники предъявляет все новые требования к способам про-

изводства, и в частности, к технологии сварки. Сегодня сваривают материалы, которые еще относительно недавно считались экзотическими. Это титановые, ниобиевые и бериллиевые сплавы, молибден, вольфрам, композиционные высокопрочные материалы, керамика, а также всевозможные сочетания разнородных материалов. Свариваются детали электроники толщиной несколько микрон и детали тяжелого машиностроения толщиной несколько метров. Постоянно усложняются условия, в которых выполняют сварочные работы: сваривать приходится под водой, при высоких температурах, в глубоком вакууме, при повышенной радиации, в невесомости.

Необходимость повышения производительности труда ведет к увеличению уровня механизации и автоматизации сварочного производства, к его оснащению новыми сложными машинами и агрегатами, без которых сегодня немыслимо серийное производство многих видов продукции. В сварочное производство активно внедряются роботы, что позволяет полностью автоматизировать цикл сварки деталей.

В последние годы патентные ведомства промышленно развитых стран мира ежегодно регистрируют более 200 изобретений в области сварочной техники и технологии. В различных странах мира в сварочном производстве заняты не менее 5 млн. человек.

Мировой рынок сварочной техники и услуг к началу XXI века составил порядка 40 млн. долларов, из которых 70 % приходится на сварочные материалы и около 30 % – на сварочное оборудование.

Основными тенденциями современного мирового сварочного производства являются следующие:

- ♦ создание экономичных, надежных и долговечных конструкций, работающих в различных условиях;
- ♦ сохранение лидирующего положения в будущем сварки плавлением, и прежде всего, дуговой сварки. Характерной особенностью развития дуговой сварки является сокращение доли ручной сварки покрытыми электродами за счет расширения применения более производительной механизированной сварки в защитных газах;
- ♦ поиск более совершенных способов и средств защиты расплавленного металла от влияния окружающей среды;
- ♦ создание новых средств нагрева, пригодных для сварки плавлением. Современные способы сварки плавлением основаны на использовании

поверхностных источников нагрева с интенсивностью от  $1 \cdot 10^4$  до  $1 \cdot 10^8 \dots 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Предполагается создание средств нагрева, расширяющих данный диапазон, обеспечивающих управление проплавлением, сочетающих поверхностное выделение энергии с объемным;

- ♦ совершенствование источников питания дуговой сварки, в частности, внедрение в дуговую сварку источников питания инверторного типа, наиболее важным преимуществом которых являются широчайшие возможности автоматического управления сварочным процессом;

- ♦ рост производства сварочного оборудования, прежде всего, для дуговой сварки, доля которого будет возрастать в основном за счет оборудования для механизированной сварки порошковой и сплошной проволоками при сокращении доли оборудования для ручной дуговой сварки покрытыми электродами;

- ♦ расширение применения лучевых способов сварки – электронно-лучевой и лазерной. Электронно-лучевая сварка сохранит и усилит свои позиции в области соединения высокоактивных материалов. Новые возможности для лазерной сварки открывает использование мощных лазеров нового поколения. Новейшие разработки в области лазерной техники позволят создать высокопроизводительное оборудование с дистанционным управлением для сварки конструктивных элементов во всех пространственных положениях, с использованием систем, позволяющих подводить лазерный луч к нескольким рабочим местам;

- ♦ наиболее характерной тенденцией в производстве сварочных материалов является непрерывное снижение доли электродов с покрытием для дуговой сварки и рост производства порошковой проволоки;

- ♦ сохранение основных областей применения электрической контактной сварки – автомобилестроения и бытовой техники, при создании более эффективных систем автоматического управления и повышении энергетических показателей применяемого оборудования. Контактная сварка сегодня занимает второе место на рынке сварочного оборудования и сохранит тенденцию к росту;

- ♦ развитие существующих способов сварки в твердой фазе (диффузионной, компрессионной, ультразвуковой, сварки трением) и создание новых способов данного класса;

- ♦ развитие сварки и родственных процессов, основанных на исполь-

зовании энергии взрывчатых веществ – сварки и резки взрывом, которые успешно применяются в различных средах;

- ♦ дальнейшее совершенствование технологий повышения износостойкости поверхности деталей – наплавки, нанесения покрытий напылением (с использованием газового пламени, плазмы, детонации, электронно-лучевого испарения и конденсации материалов в вакууме), позволяющих увеличить срок службы быстроизнашиваемых и тяжелонагруженных деталей, повысить надежность и работоспособность машин и механизмов;

- ♦ дальнейшее развитие «гибридных» технологий, основанных на одновременном использовании двух или более процессов соединения;

- ♦ комплексные исследования сварщиков и металлургов по созданию экономичных, хорошо свариваемых материалов для массовых сварных конструкций. Предполагается расширение объемов применения высокопрочных легированных сталей с пределом текучести 550...900 МПа в ответственных сварных конструкциях, преимущества которых очевидны с точки зрения снижения металлоемкости сварных конструкций, работающих в условиях статического и малоциклового нагружений;

- ♦ решение проблем сварки различных новых и сложных для сварки материалов, в том числе сплавов на основе железа, никеля, меди, титана, алюминидов и других интерметаллидов, разнородных материалов;

- ♦ создание современных технологий и оборудования для сварки (ультразвуковой, токами высокой частоты, трением и др.) полимеров и композитов на их основе, которые в последние десятилетия все большее внимание привлекают в качестве конструкционного материала и успешно конкурируют в ряде областей с традиционными металлическими материалами;

- ♦ поиск новых надежных методов контроля качества сварных швов, прежде всего, неразрушающих. Должны получить дальнейшее развитие работы по созданию современной аппаратуры для неразрушающего контроля качества как в заводских условиях, так и при монтаже. Особенно актуальна работа по созданию портативной аппаратуры для ультразвукового контроля, которая позволила бы с большой достоверностью определять и описывать дефекты в трехкоординатных плоскостях в автоматическом режиме;

- ♦ дальнейшее развитие теории сварочных процессов, применение различных баз данных и экспертных систем, увязка всего многообразия явлений в зоне соединения;

- ♦ моделирование полного цикла сварочного производства на базе но-

вых разработок в области информатики. Предполагается сокращение циклов разработки изделий, выполнение высококачественных швов, не требующих последующей проверки и контроля, а также использование точных методов прогнозирования срока службы конструкций и изделий, что придаст изделиям статус «безопасных» и «надежных»;

- ♦ дальнейшая механизация и автоматизация процессов соединения;
- ♦ важное значение в будущем будет иметь профессионализм и квалификация персонала, неразрывно связанные с экономической жизнеспособностью производства и качеством изделий, современными устройствами и установками, а также с оптимизированными конструкторскими решениями;
- ♦ решение проблем экологической безопасности и охраны труда. Приоритет промышленного применения в экономически развитых странах отдается экологически чистым сварочным технологиям;
- ♦ расширение работ по применению сварки для освоения космического пространства, Мирового океана;
- ♦ эффективное применение сварочных процессов в медицине;
- ♦ активное сотрудничество специалистов ведущих сварочных центров мира, создание единой базы данных.

Безусловно, приведенные выше тенденции развития сварочного производства далеко не исчерпывают картину будущего развития сварки. Кроме того, время всегда вносит свои коррективы. Несомненно только то, что сварка и далее будет интенсивно развиваться, поскольку является ключевой технологией для многих отраслей производства, строительства, транспорта, электронной техники и связи.

## **4.2. Сварочное производство Украины**

Украинская сварочная наука и сварочное производство традиционно, на протяжении многих десятилетий, занимали одно из ведущих мест в мире. Многие способы сварки, созданные украинскими учеными, получили признание и широко применяются в промышленности разных стран. В Украине был создан первый в мире специализированный НИИ в области сварки – Институт электросварки (ИЭС), носящий сегодня имя Е.О. Патона.

Среди наиболее выдающихся достижений института следующие:

- разработка и промышленное освоение способа автоматической дуговой сварки под флюсом, на основе которой была внедрена технология

автоматической сварки броневой танковой стали, механизирована сварка другой военной техники;

- осуществление автоматической сварки листовых конструкций непосредственно при монтаже;

- создание технологии сварки плавлением больших толщин – электрошлаковой сварки, которая в корне изменила производство тяжелых станин, котлов, гидроагрегатов и других уникальных сварно-прокатных, сварно-литых конструкций;

- создание способа сварки в углекислом газе тонкой проволокой; разработка процесса и оборудования для импульсно-дуговой сварки, сварки в смесях активных и инертных газов;

- исследования в области электронно-лучевой и лазерной сварки;

- разработка гибридных источников нагрева – лазер-дуга, лазер-плазма;

- создание систем автоматического управления и диагностики качества сварных соединений;

- разработка и производство нескольких поколений специализированных и универсальных машин для контактной стыковой сварки деталей широкого сортамента, в том числе оборудования для контактной сварки рельсов, которое экспортируется во многие страны мира;

- фундаментальные работы в области физико-металлургических особенностей сварки, процессов кристаллизации металла шва;

- исследования сварки в космосе и под водой;

- исследования по применению сварки в медицине и др.

В последнее десятилетие XX века произошло значительное сокращение изготовления сварных конструкций, производства сварочных материалов и ухудшение экономической ситуации в сварочном производстве, что связано с общими проблемами в промышленности Украины, прежде всего, снижением объемов промышленного производства и строительства. Наблюдалось также снижение качества сварочных работ и снижение уровня механизации. В Украине также достаточно низка доля новых, специальных способов сварки, практически не производится лазерное оборудование, продажи которого на мировом рынке возрастают ежегодно.

Однако действительность украинского сварочного производства все же не столь пессимистична. Сегодня отмечаются некоторые положительные изменения в сварке Украины. Например, имеет тенденцию развития

производство сварочного оборудования, прежде всего, для дуговой сварки – ручной, полуавтоматической и автоматической. Рыночная экономика способствует возникновению большого количества малых и средних предприятий различных форм собственности – производителей сварочных конструкций, сварочной техники и соответствующих услуг.

Сохранение научного потенциала, задела новых идей и разработок, значительных мощностей по производству конкурентоспособных сварных конструкций и сварочной техники позволяют с оптимизмом смотреть в будущее и определять базовые задачи, которые позволят сварочному производству Украины занять достойное место в ряду промышленно развитых стран.

На данном этапе главной задачей отечественного сварочного производства является проблема качества продукции и система менеджмента качества во всех звеньях сварочного производства. Качество в сварочном производстве – это решающий показатель конкурентоспособности, эффективности и надежности сварочной техники и сварных конструкций. Процесс системного подхода к обеспечению и постоянному совершенствованию менеджмента качества в разрезе международного стандарта (*ISO 9000*) сегодня реализуется во всем мире. В Украине международные сертификаты на соответствие систем качества получили 230 предприятий. Среди них – такие крупные предприятия с мощным сварочным производством, как Николаевское АО «Океан», АО «Крюковский вагонозавод», заводы «СЭЛМА» (Симферополь), КЗЭСО (Каховка).

В Украине – первой из стран СНГ – создана система подготовки, переподготовки и аттестации рабочего персонала сварочного производства по международным стандартам обучения.

### **4.3. Перспективы развития электродуговой сварки**

#### **4.3.1. Развитие механизированных способов дуговой сварки.**

##### **Роботизация в сварочном производстве**

Основной объем сварочных работ в экономике промышленно развитых стран (более 50 % по массе сваренного металла и по протяженности сварных швов) и до 70...80 % занятого в сварочном производстве персонала приходится на электродуговую сварку.

Дуга – самый распространенный источник теплоты, используемый

для сварки плавлением.

Основными промышленными способами электродуговой сварки, отличающимися по способу защиты дуги и расплавленного металла, а также по степени механизации процесса, являются, как известно, ручная дуговая сварка электродом с покрытием, полуавтоматическая и автоматическая дуговая сварка под флюсом, дуговая сварка в защитных газах.

Дуговая сварка, созданная в XIX в. русским ученым Бенардосом Н.Н., постоянно совершенствуется, впитывает новые достижения физики, химии, металлургии, электроники. *Важнейшей тенденцией современного развития электродуговой сварки является сокращение доли ручной дуговой сварки и увеличение доли механизированных способов.*

Уровень механизации и автоматизации в сварочном производстве является одним из базовых показателей, который с достаточной достоверностью позволяет оценить не только уровень индустрии сварочной техники и технологии, но и собственно сварочного производства – производства сварных изделий, конструкций и сооружений.

Механизация, как известно, предполагает замену ручных средств труда машинами и механизмами с применением для их действия различных видов энергии. В принципе все способы дуговой сварки механизированы в разной степени, по которой их делят на следующие группы:

▲ «ручные» способы – наименее совершенные механизированные способы (ручная дуговая электродом с покрытием);

▲ механизированные – подача электрода или относительное перемещение дуги и изделия выполняется с помощью механизмов (дуговая в защитных газах);

▲ автоматические (полуавтоматические) – способы дуговой сварки с применением самоходных установок либо стационарных сварочных машин (дуговая автоматическая под флюсом, дуговая сварка в защитных газах);

▲ автоматизированные способы сварки предполагают использование оборудования, входящего в состав комбинированно-сварочных станков, комплексно-механизированных и автоматизированных линий, робототехнических комплексов.

Особенно актуальны проблемы механизации и автоматизации дуговой сварки для Украины, где доля ручной дуговой сварки пока лидирует. Технологическая структура способов дуговой сварки в Украине такова: ручная дуговая сварка – 68,2 %, в защитных газах – 22,0 %, автоматическая под флюсом – 9,8 %.



В индустриально развитых странах доля металла, наплавляемого ручной дуговой сваркой, составляет 20...30 %. В ближайшие годы предполагается стабилизация доли ручной дуговой сварки в диапазоне 15...25 %.

Основными преимуществами механизированных способов дуговой сварки по сравнению с ручной электродуговой являются уменьшение расхода электродного металла, увеличение производительности, повышение качества и снижение себестоимости сварного шва, улучшение условий труда.

Важным направлением всего сварочного производства и дуговой сварки в том числе является *роботизация производства*, что связано не только со стремлением к повышению производительности, но и с насущной необходимостью обеспечивать высокое качество продукции и стабильность этого показателя при больших партиях или при частых изменениях объектов производства. Применение робототехники – универсальный путь автоматизации сварочной технологии не только в серийном, но и в мелкосерийном производстве.

Робот представляет собой автоматический программно-управляемый манипулятор, выполняющий рабочие операции со сложными пространственными перемещениями.

В 2005 г. общемировой парк промышленных роботов составил более миллиона, причем основную часть мирового парка промышленных роботов составляют роботы для сварки и родственных технологий. Роботизация сварочного производства – наиболее прогрессивный и экономически эффективный путь его развития.

Наиболее высок показатель роботизации сварочного производства в Японии, США, странах ЕС и Азиатско-Австралийского региона. Лидером по количеству ежегодно вводимых роботов является Япония, ее парк промышленных роботов составляет половину общемирового рынка.

Сварочные роботы включают отдельные типы роботов для различных способов сварки, в том числе для дуговой (наиболее многочисленная группа), рис. 4.1.

В свою очередь, роботы предъявляют специфические требования к технологии изготовления изделия: необходима высокая точность всех заготовок узла, стабильность положения сварного соединения в пространстве, высокое качество сварочных материалов. Возможность использования роботов определяется размерами и формой их рабочего пространства,

точностью позиционирования, скоростью перемещения, числом степеней подвижности инструмента, особенностями управления.

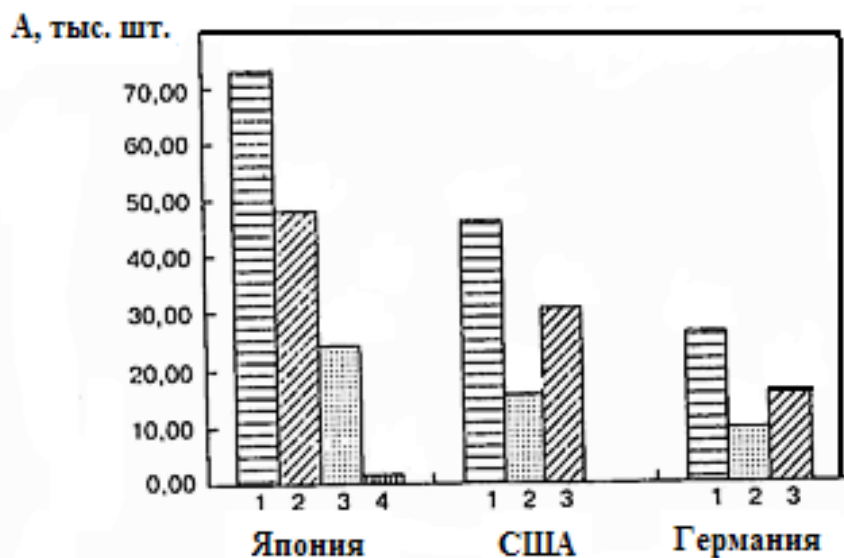


Рисунок 4.1 – Парк сварочных роботов и его структура по способам сварки: 1 – общий парк сварочных роботов; 2, 3, 4 – количество сварочных роботов, применяемых для дуговой сварки, контактной и других способов сварки соответственно

Для перемещения неориентированных в пространстве предметов достаточно трех степеней подвижности, для полной пространственной ориентации – шести. Для выполнения сварных швов в общем случае необходимо иметь пять степеней подвижности. Обычно три степени подвижности обеспечивает базовый механизм робота, а еще две – механическое устройство – кисть робота, на которой крепится рабочий инструмент. Базовый механизм робота может быть выполнен в прямоугольной (декартовой), цилиндрической, сферической и ангулярной (антропоморфной) системах координат, рис. 4.2.

Система координат базового механизма определяет конфигурацию и габариты рабочего пространства робота, в пределах которого возможно управляемое перемещение его исполнительного органа, рис. 4.3.

Робот с прямоугольной системой координат имеет рабочее пространство в виде прямоугольного параллелепипеда, размеры которого меньше габаритов самого робота, см. рис. 4.3, а. Промышленные роботы с цилиндрической и сферической системами координат обслуживают более объемное пространство при сравнительно малой площади основания манипулятора, см. рис. 4.3, б, в. Более компактными являются роботы, выполнен-

ные в антропоморфной системе координат, образующие рабочее пространство, близкое к сфере, см. рис. 4.3, *г*.

	Системы координат	Кинематическая схема	Конструктивная схема
Прямоугольная			
Цилиндрическая			
Сферическая			
Антропоморфная			

Рисунок 4.2 – Основные схемы базовых механизмов роботов

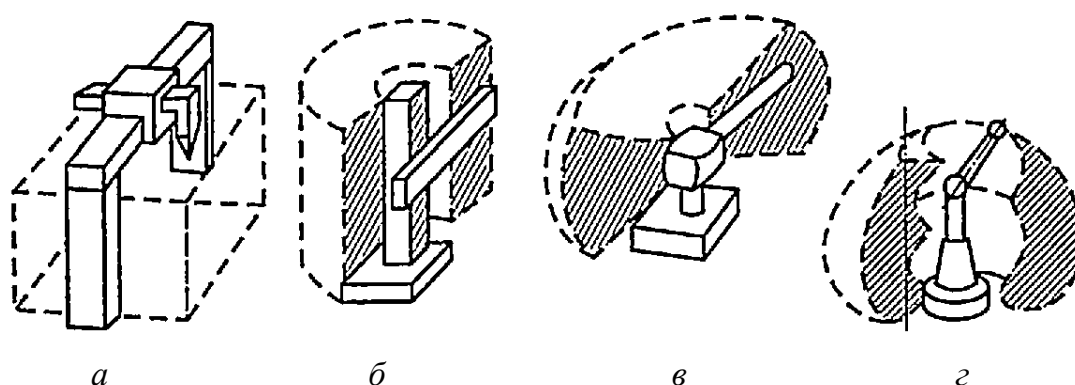


Рисунок 4.3 – Рабочее пространство роботов с прямоугольной (*а*), цилиндрической (*б*), сферической (*в*) и антропоморфной (*г*) системами координат

Темпы развития робототехники в промышленно развитых странах в конце XX – начале XXI века очень высоки, при этом происходит снижение стоимости роботов, расширение областей их применения, увеличение

разнообразия выполняемых технологических операций и повышение качества функционирования.

Промышленный робот чаще всего является манипулятором инструмента. В зависимости от назначения на руке робота закрепляют захватное устройство, горелку для дуговой сварки в среде защитных газов, резак для термической резки и т.д.

Общий вид сварочного робота приведен на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Сварочный робот

*Роботизированными технологическими комплексами (РТК)* называют снабженные роботами рабочие места или линии. В комплект РТК входят: робот, совершающий перемещение сварочного изделия, и манипулятор изделия, позволяющий сваривать швы в наиболее удобном пространственном положении. Манипулятор дополняет степени подвижности робота и работает с ним по единой программе.

Рассмотрим в качестве примера упрощенную схему робототехнического комплекса для дуговой сварки в защитных газах сварки изделий в мелко- и среднесерийном производствах.

Комплекс, рис. 4.5, включает манипулятор 4 с рабочим органом – сварочной горелкой 3; поворотный стол 2, на котором устанавливаются и точно позиционируются свариваемые изделия 1; устройство программного управления 5.

Манипулятор имеет 5..6 степеней подвижности, что позволяет ему перемещать сварочную горелку по сложной пространственной траектории, которая может программироваться и изменяться при смене свариваемого изделия. Роботы первого поколения имеют жестко заданную программу перемещения рабочего органа; роботы второго поколения (адаптивные, самонастраивающиеся) имеют специальные датчики, позволяющие им реагировать на отклонение траектории сварного шва и корректировать движение горелки.

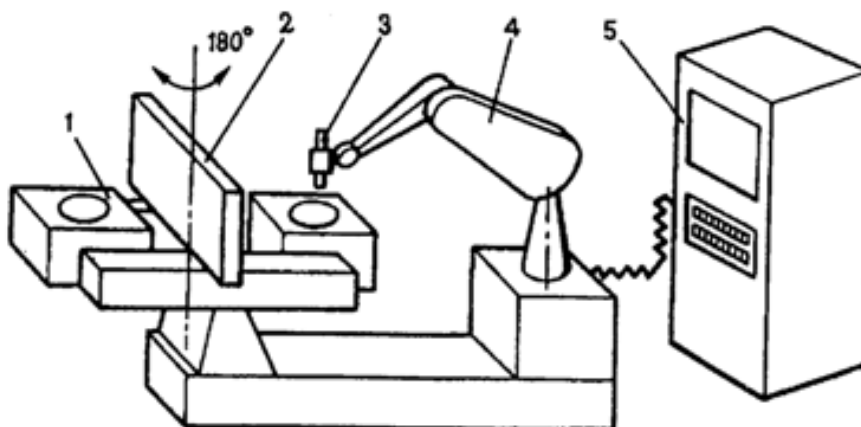


Рисунок 4.5 – Схема робототехнического комплекса для сварки корпусных деталей

#### **4.3.2. Перспективные виды источников питания для дуговой сварки. «Интеллектуальная дуга»**

Важнейшим элементом любой сварочной установки является источник питания, основными требованиями к которому являются следующие: легкое зажигание и устойчивое горение дуги, возможность регулирования силы тока, постоянство силы тока при изменении длины дуги, безаварийное состояние в режиме короткого замыкания и т.д. Для сварки на переменном токе традиционно используются трансформаторы, для сварки на постоянном токе – выпрямители и генераторы.

Самыми простыми, надежными и экономичными являются сварочные трансформаторы. Они не требуют особого обслуживания и могут работать в более жестких условиях, чем источники постоянного тока. Отрицательным свойством источников переменного тока – трансформаторов – является изменение напряжения и тока дуги в соответствии с частотой пи-

тающего источник переменного тока, что отрицательно сказывается на устойчивости горения дуги, а следовательно, и на качестве сварного шва.

Сварка на постоянном токе обеспечивает получение сварного соединения более высокого качества по сравнению со сваркой на переменном токе. Повышается стабильность горения дуги, увеличивается глубина проплавления, снижается разбрызгивание металла, улучшается защита дуги, повышаются прочностные характеристики металла сварного шва, снижается количество дефектов. Поэтому для сварки качественных ответственных соединений больше применяют сварку на постоянном токе. Кроме того, многие материалы – высоколегированные и теплоустойчивые стали, чугуны, титан, сплавы на основе меди и никеля – свариваются только на постоянном токе.

Что касается источников постоянного тока, то в последние годы сварочные генераторы почти полностью вытесняются более совершенными источниками – сварочными выпрямителями, т.е. источниками питания, в которых постоянный ток получают путем выпрямления переменного тока промышленной частоты с использованием полупроводниковых вентилях.

Для выпрямления тока используют неуправляемые полупроводниковые вентили – кремниевые или селеновые диоды (приборы с односторонней проводимостью) и управляемые вентили – тиристоры (полупроводниковые приборы на основе монокристалла кремния с 4-слойной структурой). В последнее время тиристорные выпрямители находят все более широкое применение, т.к. имеют определенные преимущества перед другими типами сварочных источников питания, в частности, обеспечивают стабильное горение дуги, пониженное разбрызгивание электродного металла, местное и дистанционное управление сварочным током, программное управление процессом сварки.

В конце прошлого века в промышленности появились (благодаря развитию новейших технологий в области полупроводниковой и микропроцессорной техники) также *инверторные источники питания* для ручной дуговой сварки на постоянном токе, которые имеют ряд преимуществ перед трансформаторами, генераторами и выпрямителями и представляют собой сварочные источники нового поколения.

При тех же сварочных токах, которые реализуются в традиционных источниках, масса инверторных источников питания в несколько раз меньше (составляет 12...18 кг), их КПД составляет до 90 %, имеется воз-

возможность дистанционного регулирования тока. Инверторы позволяют достичь высокого уровня автоматизации сварочного процесса благодаря использованию в их системах управления микропроцессоров, вычислительной техники, роботов.

Возможности инверторных источников в плане повышения качества сварного шва, производительности сварки и возможности управления ее параметрами столь велики, что технологию дуговой сварки с применением данных источников называли *«интеллектуальной дугой»*.

К технологическим преимуществам инверторов по сравнению с традиционными источниками, кроме указанных, относятся также следующие: хороший поджог дуги; малое разбрызгивание металла; возможность использования электрода практически без остатка благодаря высокой стабильности сварочного тока; увеличение производительности; экономия энергии; высокая эффективность работы сварщика; плавное регулирование сварочного тока в широком диапазоне, что весьма важно для выполнения потолочных и вертикальных швов. Все эти свойства делают инверторы технологически эффективными и экономически выгодными при выполнении монтажных работ, при сварке на высоте, в условиях ограниченного пространства.

Инверторные источники можно использовать практически для любого метода дуговой сварки, ультразвуковой и микроплазменной, контактной сварки, а также для плазменной резки.

Возможно программирование параметров сварки при помощи встроенной экспертной системы или специального программного обеспечения через персональный компьютер. Система управления инверторного источника на базе микропроцессора, являясь гибкой и настраиваемой, не только контролирует состояние сварочного источника, обеспечивая безопасность и надежность функционирования, но и рассчитывает сварочные характеристики, поддерживая их с высокой точностью.

Обеспечивается также всемирная коммуникация через Интернет благодаря стандартному последовательному интерфейсу сопряжения с персональным компьютером, например, для обновления программ сварки, дистанционной диагностики системы сварки и т.д.

Инвертор (от лат. *inverto* – переворачиваю, изменяю) как составная часть инверторного источника питания представляет собой устройство, преобразующее постоянный ток в переменный повышенной частоты (до

10..20 кГц и более). Инвертор состоит из коммутирующих элементов, которые включены между источником постоянного напряжения и нагрузкой. Коммутация в силовом контуре инвертора производится циклически (в результате через нагрузку течет переменный ток) и осуществляется с помощью полупроводниковых приборов, работающих поочередно в открытом или закрытом состоянии по заданному алгоритму.

Получение с помощью инвертора переменного тока повышенной частоты дает возможность реализовать существующую закономерность, которая состоит в том, что преобразователи энергии с повышенными номинальными значениями частоты вращения или частоты тока имеют значительно меньшие размеры и массу. Кроме того, использование для сварки переменного тока повышенной частоты может обеспечить даже лучшие, чем при сварке постоянным током, параметры сварного шва и производительности процесса. Как правило, инверторные источники используются все же с выпрямлением переменного тока, что связано с повышенным шумовым эффектом сварочной дуги на повышенных частотах.

Принципиальная схема силовой части инверторного источника приведена на рис. 4.6.

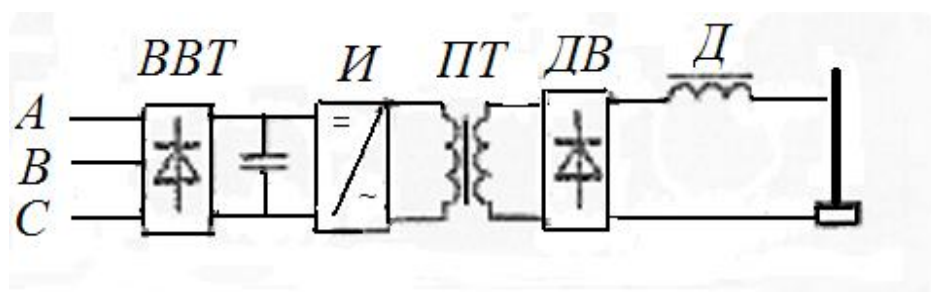


Рисунок 4.6 – Принципиальная схема силовой части инверторного источника с выпрямлением сварочного тока:

*A, B, C* – трехфазная электрическая сеть; *BBT* – входной выпрямитель тока; *И* – инвертор; *ПТ* – понижающий трансформатор; *ДВ* – диодный выпрямитель; *Д* – дроссель

Инверторный источник сварочного тока работает следующим образом. Переменный ток трехфазной (или однофазной) сети промышленной частоты, см. рис. 4.6, преобразуется входным выпрямителем в постоянный ток. Этот ток, в свою очередь, преобразуется с помощью инвертора в переменный ток повышенной частоты, который затем поступает на понижающий высокочастотный трансформатор. Вторичная обмотка трансформатора



тора нагружена на диодный выпрямитель, к выходу которого через сглаживающий дроссель подключены электрод и изделие.

При использовании инверторных источников удается получить широкий спектр вольт-амперных характеристик – от крутопадающей до возрастающей со снижением отклонений тока до уровня десятых долей процента, что позволяет добиваться высокого качества сварки.

За счет небольшой массы инверторы малой мощности (переносные компактные), рис. 4.7, очень перспективны для использования при монтаже особо ответственных металлоконструкций и трубопроводов, к сварным соединениям которых предъявляются повышенные требования, а условия работы не позволяют применять громоздкое промышленное оборудование, предназначенное для работы в цеховых условиях.



Рисунок 4.7 –Сварочные инверторы:  
а – переносной; б – multifunctional

Инверторные сварочные аппараты представляют собой технически сложные изделия, производство которых сопряжено с решением целого комплекса технических и организационных проблем. Наличие сложной и дорогой электроники, требующей особых условий охлаждения, резко увеличивает стоимость инверторных источников (стоимость инверторных источников выше, чем аналогичных по мощности выпрямителей, на 25...50 % и вдвое выше стоимости трансформаторов), но высокое качество получае-

мых сварных соединений и широкий спектр методов сварки делает их наиболее перспективными для промышленного применения, особенно при производстве сложных и ответственных металлоконструкций из различных материалов. Очевидные технические преимущества инверторов и тенденция к снижению их стоимости позволяют прогнозировать постепенное увеличение их доли в общем объеме электродуговой техники.

В Украине около 40 предприятий производят сварочное оборудование для электродуговой сварки, причем в последние годы отмечается положительная тенденция их развития и расширения объемов экспорта. Производятся источники питания, сложные сварочные аппараты, сварочные тракторы, автоматы и полуавтоматы.

Основными производителями источников питания для дуговой сварки в Украине являются ОАО «Каховский завод электросварочного оборудования» (трансформаторы, выпрямители последнего поколения, автоматы и полуавтоматы для дуговой сварки и наплавки), «Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им. Е.О. Патона», НТ СКБ «Полисвет» ПО «Коммунар» (Харьков), ОАО «Киевский завод сварочного оборудования» и др.

#### **4.3.3. Новые высокоэффективные модификации способа электродуговой сварки**

На определенном этапе развития традиционные способы сварки достигли предела своих возможностей, который, вероятно, нельзя существенно повысить путем дальнейшего совершенствования источников питания, сварочных материалов или защитных газов. Поэтому с целью расширения технологических возможностей и областей применения существующих способов электродуговой сварки разрабатываются различные их модификации, связанные с изменением характера дуги, ее усилением путем использования двухэлектродных процессов, с активизацией процессов в прианодной области дуги и в сварочной ванне и т.д. Рассмотрим некоторые из разработанных в последние годы и уже нашедших практическое применение новых способов дуговой сварки.

■ **Импульсная ТИГ- и МИГ- сварка** (ТИГ – принятое в мировой сварочной практике название дуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в среде инертного защитного газа, от *TIG – Tungsten Inert Gas*; МИГ – принятое в мировой сварочной практике название полуавтома-

тической дуговой сварки металлическим электродом в среде инертного защитного газа, от *MIG – Metal Inert Gas*).

*Импульсный характер дуги* обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с традиционным способом дуговой сварки в среде защитных инертных газов: уменьшает размеры зоны разупрочнения и деформации, позволяет снизить потребляемую электроэнергию, увеличить глубину проплавления, повышает стабильность горения дуги.

При этом достигается оптимальное качество сварки, улучшается внешний вид сварного соединения, улучшаются условия труда – снижается разбрызгивание металла и дымообразование. Импульсный характер сварки позволяет реализовать форсированные режимы и, следовательно, повысить производительность сварки.

■ **Двухдуговая сварка ТИГ.** В отличие от традиционного ТИГ-способа, в данном способе используются два вольфрамовых электрода в одной горелке при подаче импульсного тока к каждому из электродов, рис.4.8.

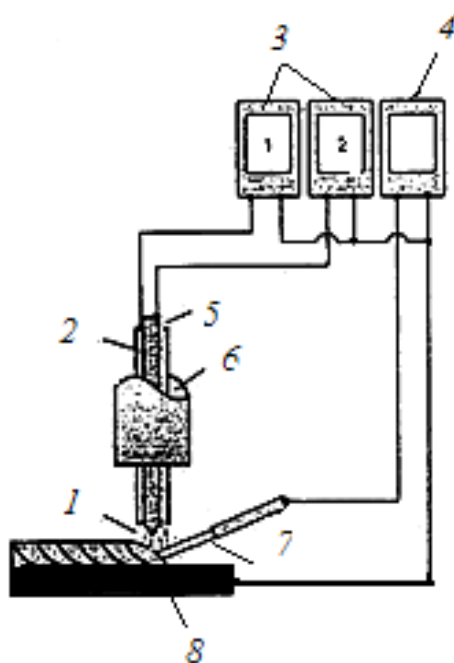


Рисунок 4.8 – Схема процесса двухдуговой сварки ТИГ:  
1 – дуга; 2,5 – электроды; 3 – сварочные источники питания;  
4 – источник подогрева присадочной проволоки; 6 – защитный газ;  
7 – присадочная проволока; 8 – обрабатываемое изделие

Благодаря наличию двух электродов удается решить некоторые наиболее важные проблемы метода ТИГ, т.е. увеличить глубину проплавления свариваемого металла и скорость расплавления металла при сварке.

Метод успешно реализован при строительстве резервуаров для хранения сжиженного газа.

■ **МИГ- и МАГ- сварка двумя проволоками** (МАГ – дуговая сварка металлическим электродом в среде активных защитных газов, от *MAG – Metal Active Gas*).

По своей сути способ аналогичен двухдуговой сварке ТИГ и основан на применении двух металлических проволочных электродов при сварке в защитных газах (активных и инертных), расположенных в общем газовом сопле.

Возможны различные варианты данного процесса, наиболее перспективен метод так называемой тандемной сварки: каждый из металлических проволочных электродов подается в зону сварки отдельным механизмом подачи и подсоединен к своему сварочному источнику, рис. 4.9. Для каждого из электродов могут использоваться свои сварочные параметры.

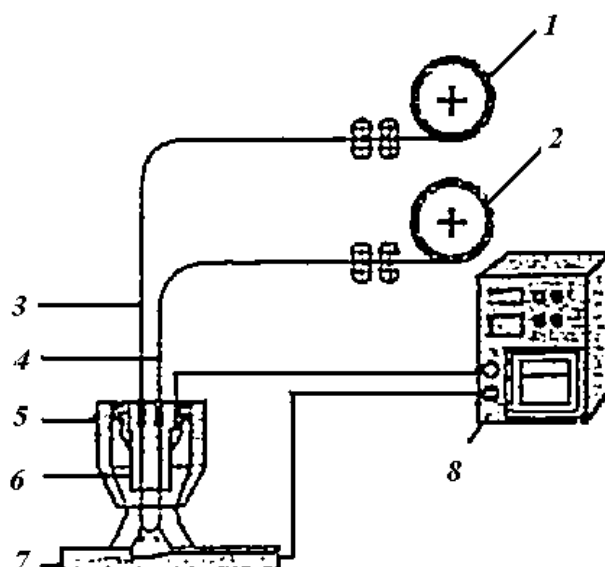


Рисунок 4.9 – Схема тандемной МИГ-сварки:

1, 2 – механизм подачи проволоки; 3, 4 – проволочные металлические электроды; 5 – газовое сопло; 6 – мундштук; 7 – обрабатываемая деталь; 8 – источник питания

Использование сварки двумя проволоками влияет на форму сварочной ванны: расположение электродов один позади другого удлиняет сварочную ванну в направлении линии сварки. При этом задачи каждой дуги, работающей на общую сварочную ванну, различны: ведущая проволока выполняет тяжелую задачу нагрева электрода и основного металла с целью

образования сварочной ванны, обеспечивает достаточный уровень проплавления; ведомая проволока заполняет разделку, сглаживая поверхность шва.

Удлиненная форма сварочной ванны обеспечивает более эффективную дегазацию, что снижает склонность к образованию пористости.

Способ позволяет вести сварку короткой дугой, использовать проволоку различного диаметра при различной скорости ее подачи для стабильности сварочного процесса.

Тандемная сварка обеспечивает более высокие показатели проплавления, качества сварного шва и производительности по сравнению со сваркой одной проволокой.

Тандемная сварка разработана специально для тяжелых условий сварки с жесткими требованиями к коэффициенту использования оборудования по времени и длительности сварки. Данный способ применяется для сварки судостроительных конструкций.

■ **Способ сварки А-ТИГ.** Данный способ заключается в том, что на поверхность свариваемого стыка при дуговой сварке вольфрамовым электродом в среде инертных газов наносится активирующий флюс.

Активирующая добавка вызывает сжатие дуги, что приводит к усилению электродинамического воздействия на металл, повышению интенсивности его поверхностного нагрева и, как следствие, к резкому увеличению глубины проплавления.

По сравнению с обычной ТИГ - сваркой применение А-ТИГ - сварки позволяет увеличить глубину проплавления до 12 мм и выше; уменьшить ширину шва; проводить сварку без присадочного металла; повысить производительность сварки в 2...7 раз; снизить стоимость сварочных работ в 2...5 раз за счет снижения затрат на электроэнергию, защитный газ, проволоку; сократить время сварки, уменьшить деформации при сварке.

А-ТИГ - сварка выполняется как непрерывной, так и импульсной дугой; свариваются листовые, емкостные конструкции, соединяют трубы.

■ **Сварка вращающейся дугой.** Новым и перспективным способом электродуговой сварки является сварка вращающейся дугой: сварочная дуга вращается в магнитном поле, в цилиндрическом объеме, создавая область сварки по всей площади контакта.

Применение данной технологии эффективно, например, для сварки кольцевых стыков труб.

При сварке по схеме, представленной на рис. 4.10, трубы собирают с определенным зазором. Дуга возбуждается в зазоре между кромками. Направление тока дуги совпадает с осью труб. Катушки электромагнита создают внешние магнитные потоки, направленные встречно, что приводит к созданию в зазоре между трубами радиальной составляющей магнитного поля, см. рис. 4.10. Взаимодействие радиальной составляющей внешнего магнитного поля с магнитным полем дуги приводит к перемещению дуги по кромкам труб. После их нагрева и оплавления производят осадку вдоль оси.

Скорость перемещения дуги в магнитном поле зависит от величины сварочного тока, напряженности внешнего магнитного поля, металла изделия и ряда других условий сварки.

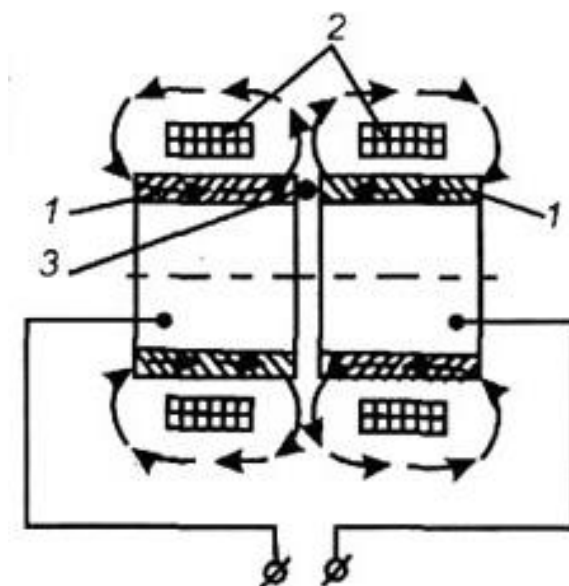


Рисунок 4.10 – Сварка дугой, вращающейся в магнитном поле:  
1 – трубы; 2 – катушки электромагнитов; 3 – электрическая дуга

#### 4.4. Электронно-лучевая сварка и ее развитие

Обширную группу перспективных методов сварки составляют лучевые способы, относящиеся к способам сварки плавлением, в которых в качестве источника нагрева используют узконаправленные концентрированные лучевые потоки – поток ускоренных электронов, световой луч высокой энергии.

Характерными особенностями этих методов являются высокая плотность энергии, табл. 4.1, высокое качество сварного шва, хороший товар-

ный вид, незначительные размеры зоны термического влияния, значительно меньшая деформация металла околошовных участков по сравнению с другими способами сварки плавлением, прежде всего, дуговой сваркой.

Таблица 4.1 – Характеристики источника нагрева в различных способах сварки плавлением

Вид сварки	Минимальная площадь пятна нагрева $S$ , мм <sup>2</sup>	Максимальная плотность потока излучения в пятне нагрева $E$ , Вт/см <sup>2</sup>
Ручная электродуговая	$10^{-1}$	$10^5$
Дуговая в защитных газах (аргонодуговая)	$10^{-1}$	$10^5$
Газовая	1	$5 \cdot 10^2$
Микроплазменная	$10^{-4}$	$10^6$
Электронно-лучевая	$10^{-5}$	$10^7$
Лазерная	$10^{-6}$	$10^8$

Ограничениями лучевых способов являются невысокая производительность, ограничение размеров свариваемых изделий и, главное, высокая стоимость. Поэтому применение данных способов оправдано при получении особо ответственных изделий машиностроения, приборостроения, авиационной промышленности, микроэлектроники при высоких требованиях к точности и качеству получаемых изделий.

Широкое применение новых конструкционных материалов на основе тугоплавких и высокоактивных металлов (титана, циркония, молибдена, вольфрама и др.) потребовало создания способа их обработки источником тепла с высокой плотностью энергии в условиях защиты от взаимодействия с газами воздуха (кислородом, азотом). Наиболее полно этим условиям отвечает электронно-лучевая технология сварки (ЭЛС).

Рассмотрим принцип ее реализации, технологические характеристики, области применения и перспективы развития.

Схема установки для электронно-лучевой сварки приведена на рис. 4. 11.

Основными узлами установки для ЭЛС являются: электронная пушка, системы фокусировки и отклонения пучка, вакуумная камера с соответствующим оборудованием для создания вакуума  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  Па, устройство для перемещения луча вдоль линии соединения либо заготовки под электронной пушкой.

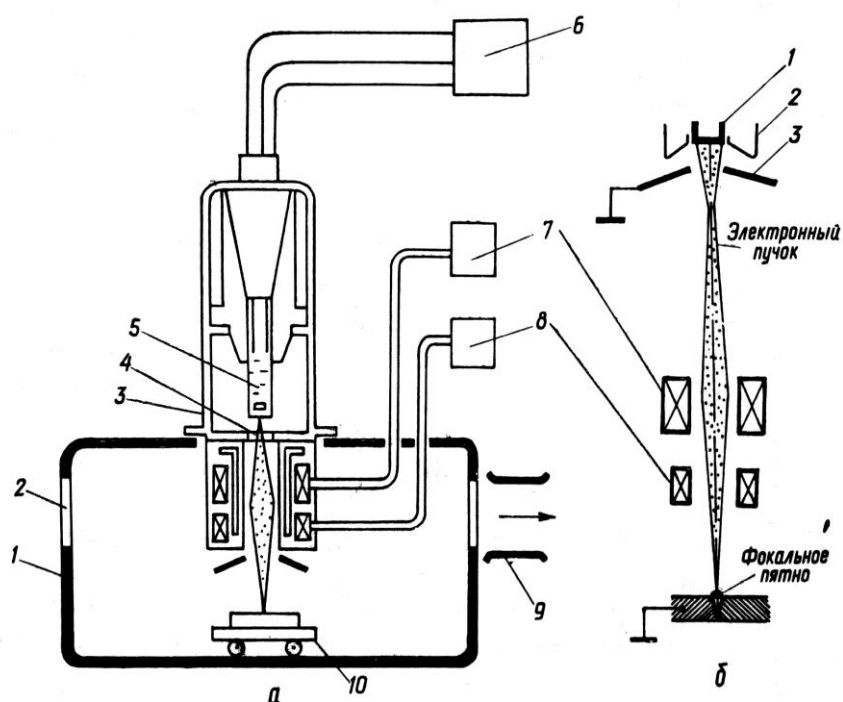


Рисунок 4.11 – Схема электронно-лучевой сварки:

*а* – схема типовой электронно-лучевой сварочной установки:

*1* – вакуумная камера; *2* – смотровое окно; *3* – электронно-оптическая система; *4* – анод пушки; *5* – катод и прикатодный электрод;

*б* – высоковольтный выпрямитель; *7* – система фокусировки пучка;

*8* – система электромагнитного отклонения пучка; *9* – отвод к вакуумному насосу; *10* – механизм перемещения сварочного изделия;

*б* – одна из возможных конструкций электронно-оптической системы:

*1* – катод; *2* – прикатодный (фокусирующий) электрод; *3* – анод; *7* – фокусирующие электромагнитные линзы; *8* – отклоняющие электромагнитные линзы

Электронная пушка предназначена для получения регулируемого пучка электронов и состоит из источника электронов – катода *1*, см. рис. 4.11, б, в виде тонкой вольфрамовой или танталовой проволоки, фокусирующего (прикатодного) электрода *2* и анода *3* в виде диска с отверстием. Электроны, испускаемые за счет эмиссии с нагретого катода, формируются в пучок фокусирующим электродом и ускоряются под действием разности потен-



циалов между катодом и анодом ( $U = 20 \dots 150$  кВ); скорость электронов в пучке может достигать  $0,2 \dots 0,5$  скорости света. Далее с помощью системы электромагнитных линз (фокусирующих 7 и отклоняющих 8, см. рис. 4.11, б) пучок фокусируется в виде луча в пятне размером  $\sim 1 \dots 0,01$  мм и направляется на свариваемое изделие.

При контакте ускоренного сфокусированного потока электронов с поверхностью свариваемого изделия практически вся (до 99 %) кинетическая энергия ускоренных электронов превращается в тепловую, в результате температура в месте соударения может достигать  $5000 \dots 6000$  °С. Плотность потока излучения в пятне фокусировки при этом достигает  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, см. табл. 4.1. При такой температуре и концентрации энергии плавятся и испаряются любые известные материалы.

Толщина слоя материала  $\delta$ , при которой электрон теряет свою энергию, зависит от ускоряющего напряжения  $U$  и плотности материала  $\rho$ :  $\delta \sim U / \rho$ . Например, для стали ( $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>) при  $U = 60$  кВ толщина слоя  $\delta = 12$  мкм. Следовательно, энергия луча преобразуется в тепловую внутри тонкого поверхностного слоя.

При взаимодействии электронного луча с обрабатываемым материалом, возникает целый ряд явлений (тепловое и рентгеновское излучение, вторичные и отраженные электроны), рис. 4.12, снижающих эффективно используемую долю энергии электронного луча для нагрева и плавления свариваемого материала и влияющих на особенности конструкции сварочных установок.

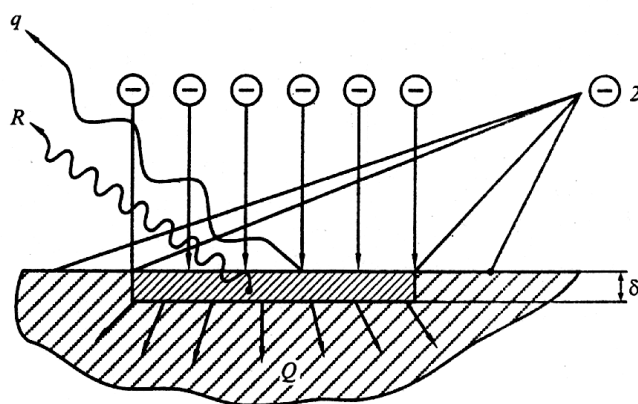


Рисунок 4.12 – Явления, возникающие при воздействии электронного луча на обрабатываемый материал:  $Q$  – теплота, распространяющаяся в свариваемом металле;  $R$  – рентгеновское излучение;  $q$  – тепловое излучение;  $\Theta_2$  – вторичные электроны

Благодаря высокой плотности потока излучения при ЭЛС, в сотни раз превышающей аналогичный параметр при электродуговой сварке, см. табл. 4.1, реализуется возможность глубинного («кинжального») проплавления с соотношением глубины проплавления и ширины шва 20:1 (и даже 50:1). Для сравнения – при электродуговой сварке это соотношение составляет 1:1...0,3, рис. 4.13.

Эта особенность ЭЛС позволяет сваривать металл достаточно большой толщины (до 200 мм) с минимальной по сравнению с другими методами зоной термического влияния и деформацией металла в околошовной зоне, например, для точного машиностроения. Благодаря узкому и глубокому проплавлению улучшается качество сварного шва. Высокие скорости кристаллизации при эффективном теплоотводе обеспечивают получение высоких механических свойств сварного соединения.

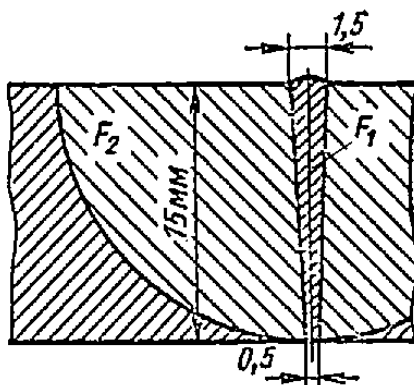


Рисунок 4.13 – Проплавление при электронно-лучевой и электродуговой сварке:  $F_1$  – сечение шва при электронно-лучевой сварке;  $F_2$  – сечение шва при ручной дуговой сварке

То обстоятельство, что электронно-лучевая сварка производится в наиболее совершенной защитной среде (в вакууме), создает также ряд преимуществ.

Вакуум – чистая среда, что позволяет сваривать высокоактивные материалы без опасности их загрязнения. Вакуум обеспечивает удаление газов из сварного шва, способствует устранению оксидов и загрязнений как с поверхности металла, так и из внутренних слоев. Наконец, в вакууме можно осуществлять дистанционную сварку – с помощью электронно-оптической системы электронный луч удастся фокусировать в нужном ме-

сте на значительных расстояниях от пушки. Это придает сварочной системе большую гибкость, позволяет производить сварку в труднодоступных местах.

Электронно-лучевую сварку можно использовать для изготовления широкого круга изделий, начиная со схем микроэлектроники и кончая крупногабаритными деталями длиной и диаметром до нескольких метров, например, для тракторной, авиационной, энергетической, химической промышленности, ракетостроения. С помощью электронно-лучевых установок можно сваривать стальные детали толщиной до 150 мм, а титановые и алюминиевые – до 250 мм. Минимальная толщина свариваемых заготовок составляет 0,02 мм.

Сваривать можно разнообразные металлические материалы в однородных и разнородных сочетаниях, со значительной разностью толщин, температур плавления и других теплофизических свойств, а также металлы с неметаллами, неметаллические материалы.

Высокая стоимость вакуумных камер пока сдерживает широкое применение ЭЛС для деталей средних и крупных размеров, и до настоящего времени электронно-лучевая сварка еще всерьез не конкурирует с традиционными методами сварки плавлением, но постепенно для нее открываются новые области применения.

Например, в машиностроении ЭЛС применяется для сварки блоков шестерен автомобилей, тракторов, сложной конструкции клапанов из коррозионностойкой стали, мембранных коробок, причем эти детали можно сварить из механически обработанных заготовок, почти не нарушая размерные допуски; эти узлы не нужно термически и механически обрабатывать, как при дуговой сварке.

Электронно-лучевая сварка применяется также для изготовления авиационных двигателей, панелей крыла, воздушных винтов самолета.

В энергомашиностроении высокая точность и прочность сварных соединений упрощает изготовление заготовок под крупные узлы, обеспечивает экономическую эффективность ЭЛС при производстве корпусов роторов и валов газовых турбин и компрессоров, теплообменных аппаратов.

Некоторые виды изделий, полученных ЭЛС, приведены на рис. 4.14.

Новые горизонты в применении технологии ЭЛС непосредственно связаны с созданием автоматизированных систем управления широкой функциональной направленности, которые дают возможность реализовать

сварку большой номенклатуры изделий современной техники. Сегодня благодаря развитию компьютерных технологий высший уровень автоматизации в ЭЛС обеспечивают системы управления, принцип работы которых базируется на физических параметрах взаимодействия электронного пучка с материалом сварного изделия. При этом в качестве параметров управления могут использоваться вторичная электронная эмиссия, ионный поток плазмы, рентгеновское излучение, ток проплавления и т.д.

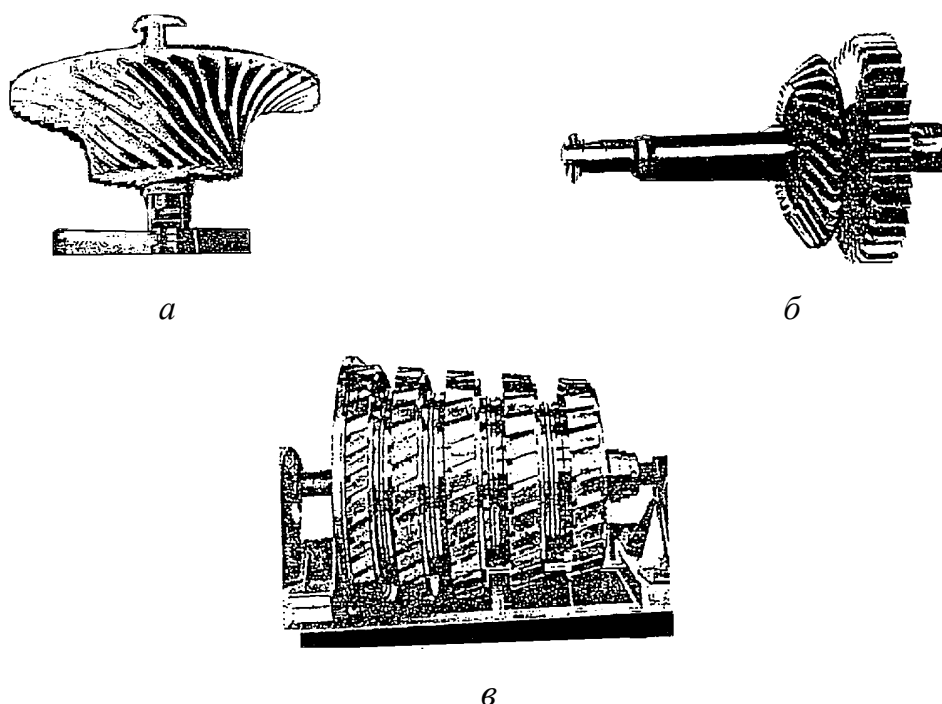


Рисунок 4.14 – Корпус ротора газовой турбины из сплава ВЖЛ-14Н (*а*), шестерня из стали 18Х2НМА для судовых энергетических агрегатов (*б*), корпус компрессора из сплава ВТ8, полученные электронно-лучевой сваркой

Рассмотрим еще одно перспективное направление развития ЭЛС. Поскольку электронный луч представляет собой пучок первичных ускоренных электронов, обладающих малой массой и отрицательным зарядом, имеется возможность при помощи электромагнитного поля, практически безынерционного, сканировать этот луч по выбранной траектории с большой частотой.

Для реализации этих возможностей уже разработано программное обеспечение, позволяющее как «размножать» зоны облучения, рис. 4.15, т.е. выполнять одновременно несколько (до пяти и более) сварных швов с целью увеличения производительности или уменьшения деформации сва-

риваемого изделия, так и воздействовать на процессы кристаллизации металла сварочной ванны или структурные превращения в металле шва и околошовной зоне в пределах одной зоны облучения.

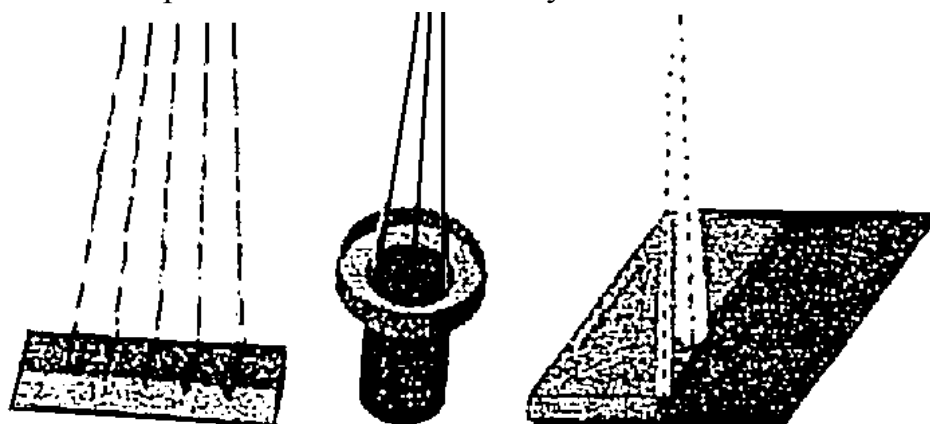


Рисунок 4.15 – Электронно-лучевая сварка с параллельными швами

Перспективным направлением развития технологии ЭЛС является также усовершенствование оборудования. Наиболее оптимальным вариантом сегодня являются универсальные рабочие камеры, где обрабатываемая деталь перемещается в трех направлениях. Однако при этом имеет место довольно продолжительный простой, в то время как все этапы работы (загрузка обрабатываемой детали, вакуумирование, сварка, снятие обрабатываемой детали и т.д.) должны выполняться один за другим. Для сокращения рабочих циклов создано специальное оборудование – установки циклического действия, двухкамерные, конвейерные машины и шлюзовые камеры.

В двухкамерных установках, рис. 4.16, *а*, рабочие камеры расположены рядом.

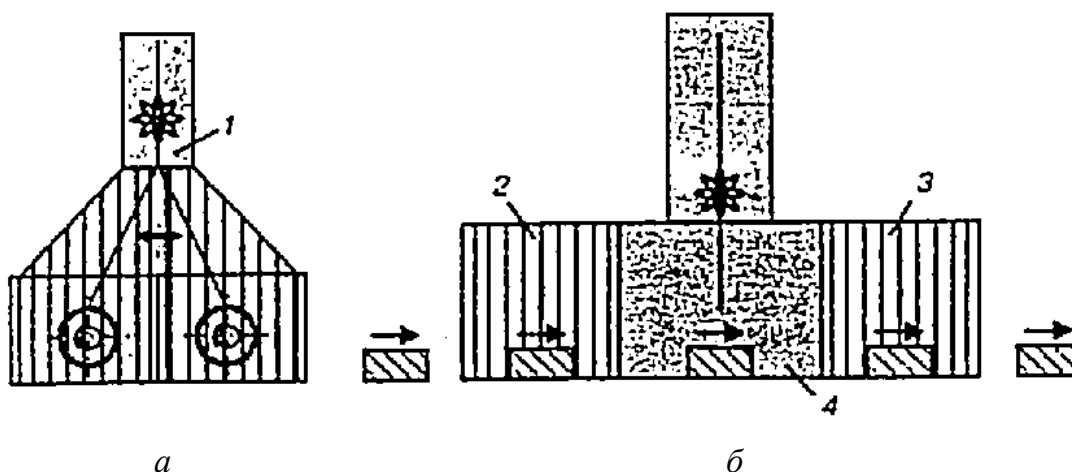


Рисунок 4.16 – Схемы вакуумных камер для электронно-лучевой сварки:

*а* – двухкамерная установка;  
*б* – шлюзовая сварочная установка;  
*1* – отклоняемый луч; *2,3* – рабочие отсеки; *4* – отсек с высоким вакуумом

Генератор луча либо перемещается от одной камеры к другой, либо за один проход отклоняется в сторону только одной камеры. Таким образом, сварка может выполняться в одной камере, в то время как в другой будет происходить загрузка, разгрузка или вакуумирование.

Другим перспективным вариантом являются шлюзовые сварочные установки, рис. 4.16, *б*. В них вакуум постоянно поддерживается в той камере, где выполняется сварка, в других отсеках могут выполняться загрузка, разгрузка и другие операции.

Наиболее оптимальным вариантом для сварки подобных деталей с идентичной геометрией шва являются установки циклического действия, в которых под камерой, оснащенной одной или несколькими установками загрузки деталей с коротким временем вакуумирования, установлено поворотное приспособление с вертикальной, горизонтальной и поворотной осями. Поэтому загрузка, разгрузка и сварка могут выполняться одновременно.

Вакуум благотворно влияет на процесс сварки, но он же создает ограничения для сварки деталей больших размеров, мешает автоматизации процесса. Большую деталь в сварочную камеру поместить сложно, а необходимость после каждого цикла сварки разгерметизировать камеру и загружать в нее новые детали не позволяет автоматизировать процесс.

Вот почему ведутся разработки систем для ЭЛС в атмосфере. Для этого надо решить две задачи: вывести электронный луч из вакуума в атмосферу и обеспечить достаточную мощность луча на нужном расстоянии электронно-оптической системы. Наиболее сложна первая задача. Обычно поступают так: на пути пучка имеется ряд камер с отверстиями, сквозь которые он проходит. Вакуумная система откачивает камеры таким образом, что давление в них повышается по мере удаления от пушки и постепенно достигает атмосферного на выходе из системы. Такая система ступенчатой откачки, рис. 4.17, усложняет и удорожает установку, хотя и имеет бесспорные преимущества.

Средой, для которой электронно-лучевая сварка будто бы специально создана, является открытое космическое пространство. Вакуум кос-

мического пространства может быть использован для автоматической и ручной электронно-лучевой сварки отдельных деталей, узлов, при сборке космических платформ и различных ремонтных работах в космосе.

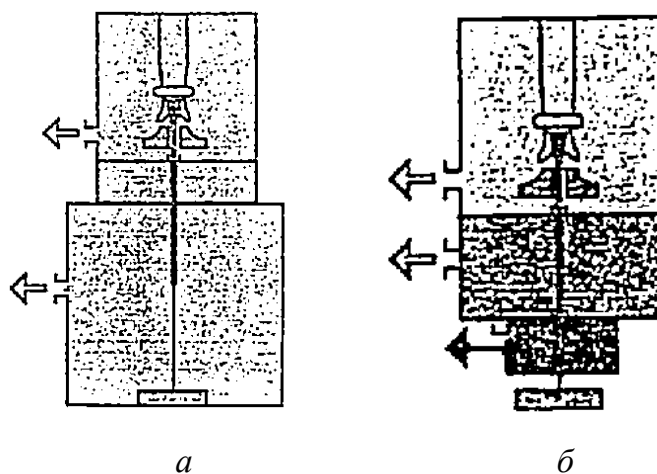


Рисунок 4.17 – Схема ЭЛС в условиях высокого вакуума (а) и безвакуумная ЭЛС (б)

## 4.5. Лазерная сварка и перспективы ее совершенствования

### 4.5.1. Лазерная техника

Лазерная обработка материалов является одной из ведущих технологий, которые во многом определяют современный уровень производства в промышленно развитых странах. Отличительные черты применения лазеров в производстве – высокое качество получаемых изделий, высокая производительность процессов, экономия материальных ресурсов, экологическая чистота.

Первые лазеры (и предшествующие мазеры) появились в конце 1950-х – начале 1960-х годов, их создание явилось одним из главных научных открытий XX века. Принцип действия лазера был открыт независимо друг от друга русскими физиками Н.Г. Басовым, А.М. Прохоровым и американцем Ч.Таунсом; открытие было удостоено Нобелевской премии.

Принцип действия лазера заложен в названии лазера: *laser* – аббревиатура от *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – усиление света в результате вынужденного излучения.

Получаемый в лазерах (оптических квантовых генераторах) интенсивный сконцентрированный световой луч является мощным тепловым источником, используемым для целого ряда процессов обработки материалов. Сегодня лазерные устройства являются неотъемлемой частью совре-

менного промышленного производства и стали своего рода символом высоких технологий.

Основные характеристики лазерного излучения: когерентность (согласованность волновых процессов в пространстве и во времени, что теоретически позволяет сфокусировать лазерное излучение в пятно диаметром, равным длине волны); монохроматичность (лазерное излучение представляет собой свет практически одной длины волны); направленность (это значит, что энергия может передаваться по лучу на большие расстояния и в соответствии с законами геометрической оптики легко фокусироваться на площадки небольших размеров).

Лазеры разнообразны по конструкции, назначению, габаритам. Есть миниатюрные лазеры, помещающиеся на ладони. А есть лазеры-гиганты длиной в несколько метров и весом до нескольких тонн.

Лазеры могут излучать энергию в различных режимах: непрерывно в течение длительного времени, однократно в виде одиночной вспышки, в импульсном режиме с разными частотами повторения.

Развитие лазерной техники идет в направлении повышения их мощности, повышения КПД, возможности компьютерного управления, передачи световой энергии на большие расстояния, уменьшения габаритов оборудования, снижения его стоимости.

Лазерные технологии позволяют в большей мере, чем традиционные технологии, локализовать и минимизировать подвод энергии к обрабатываемому материалу и тем самым выйти на недостижимые ранее результаты.

Основными характеристиками лазеров являются следующие: *«качество» пучка* (вид кривой распределения энергии в поперечном сечении луча); *размеры пятна фокусировки* (диаметр); *глубина резкости* (глубина, в пределах которой плотность потока излучения изменяется незначительно, фактически, это глубина проникновения лазерного излучения, которая обратно пропорциональна длине волны; *мощность лазера*.

В зависимости от активного элемента, т.е. основного узла лазера, генерирующего излучение, различают лазеры твердотельные (активный элемент выполняется из диэлектрических кристаллов, стекол, полупроводников), газовые лазеры, жидкостные. Каждая из групп имеет свои особенности, сильные и слабые стороны, свои характеристики.

Рассмотрим формирование излучения *твердотельного лазера* на примере лазера с активным элементом из розового рубина (окиси алюминия с примесью атомов хрома, до 0,05 %), рис.4.18. Излучение формиру-



ется следующим образом. При облучении активного элемента *1*, см. рис. 4.18, *а*, – стержня из розового рубина генератором накачки *2* (ксеноновой лампой, работающей в импульсном режиме), питающемся от источника питания *б*, ионы хрома поглощают это излучение и переходят в возбужденное состояние на верхний энергетический уровень, см. рис. 4.18, *б*. При переходе вновь на основной уровень они отдают запасенную энергию в виде кванта энергии, см. рис. 4.18, *в*, который, в свою очередь, стимулирует излучение других ионов, в результате чего все возбужденные ионы лавинообразно переходят на основной уровень, излучая энергию на частоте перехода.

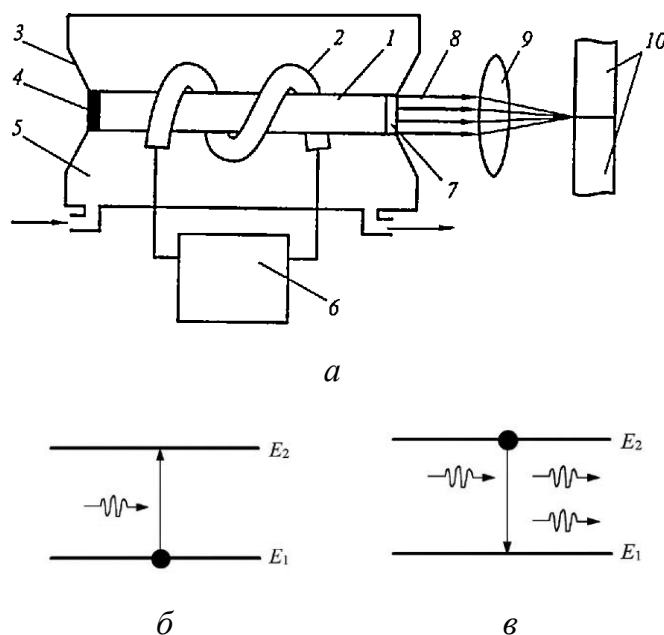


Рисунок 4.18 – Схема твердотельного лазера

Для усиления излучения, т.е. для увеличения числа возбужденных частиц, участвующих в генерировании, увеличивают размеры активного вещества и используют резонаторную систему – два зеркала. Одно зеркало *4* – полностью отражающее, т.е. непрозрачное, другое зеркало *7* – частично отражающее, полупрозрачное (отражающими зеркалами могут служить хорошо отполированные и посеребренные торцы самого кристалла). В результате электромагнитное излучение усиливается.

Для более эффективного облучения активный элемент и генератор накачки помещают в кожух *3*, внутренняя поверхность которого имеет отражающее покрытие из золота или серебра.

Благодаря многократному отражению от зеркал в резонаторной системе на выходе получают лазерный луч *8*, диаметр которого соответствует

диаметру активного элемента, а плотность энергии сравнительно невелика. Последующей фокусировкой с помощью фокусирующей линзы 9 уменьшают диаметр луча, при этом плотность энергии существенно возрастает. Сфокусированный лазерный луч направляется на свариваемое изделие 10.

Основным элементом *газового лазера*, рис.4.19, является заполненная газом разрядная трубка 1, ограниченная с двух сторон параллельными зеркалами: непрозрачным 2 и полупрозрачным 5. С помощью системы откачки 4 в полости лазера создается необходимое разрежение. В результате электрического разряда между введенными в трубку электродами, создаваемого с помощью источника питания 3, возникают быстрые электроны, которые возбуждают газовые молекулы. Возвращаясь в стабильное состояние, эти молекулы образуют кванты света, аналогично твердотельным лазерам.

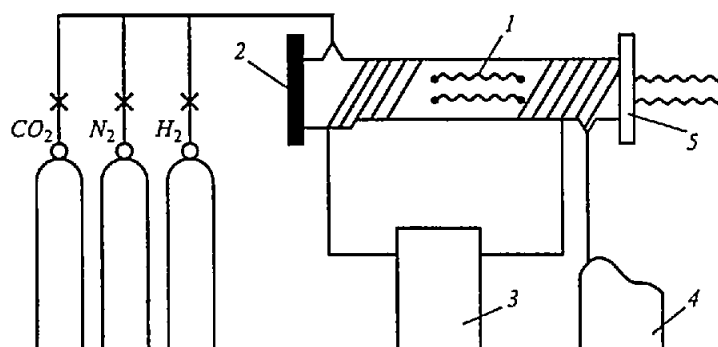


Рисунок 4.19 – Схема сварки газовым лазером

В промышленности для сварочных работ применяют *твердотельные лазеры* (наиболее распространенные – на алюмоиттриевом гранате с неодимом – Nd-АИГ, генерирующие излучение инфракрасного диапазона с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм, рис. 4.20) и *газовые лазеры* (в основном, с  $\text{CO}_2$  – активным элементом и длиной волны излучения  $\lambda = 10,6$  мкм).

Мощность газовых лазеров уже достигает 50...70 кВт, твердотельных – 2...10 кВт.

Недостатками газовых  $\text{CO}_2$ -лазеров являются их большие размеры (длина активного элемента достигает одного метра), высокие требования к охлаждению, большой размер пятна фокусировки – 30 мкм, малая глубина резкости (на порядок меньше, чем в твердотельных лазерах) и невозможность транспортировки излучения с помощью оптических волокон.

Этих недостатков лишены АИГ-лазеры, длина активного элемента

которых составляет 100...200 мкм, пятно фокусировки имеет диаметр менее 10 мкм, глубина резкости составляет от 20 до 2000 мкм (в зависимости от диаметра пятна фокусировки). АИГ-лазеры к тому же более просты и дешевы, поэтому их применяют чаще.

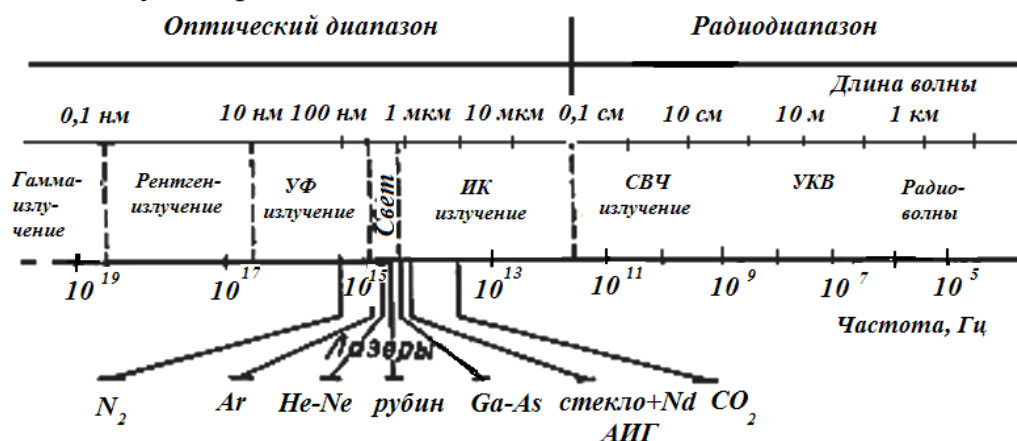


Рисунок 4.20 – Электромагнитный спектр и диапазон длин волн, в котором получено лазерное излучение

С учетом того, что современные мощные твердотельные и газовые лазеры являются довольно малоэффективными преобразователями энергии (КПД изменяется в пределах от десятых долей до нескольких процентов, максимум до 10 %), перспективными считаются разработки **полупроводниковых (диодных) лазеров**, КПД которых достигает 50 % и выше. Кроме того, они более компактны и менее сложны. Пятно фокусировки для диодных лазеров составляет 10...15 мкм. К существенным недостаткам полупроводниковых лазеров относится невысокая мощность (несколько десятков ватт) и большая расходимость излучения – до нескольких градусов.

Активным элементом в диодных лазерах является полупроводниковый кристалл (арсенид галлия, кремний с примесью индия, фосфат галлия, арсенид индия и др); наиболее распространенный способ накачки активного элемента – пропускание через кристалл тока.

Вследствие низкой мощности единичных диодных лазеров их объединяют в большую матрицу (несколько диодных лазеров объединяют в линейки, которые, в свою очередь, komponуют в диодные блоки), что дает возможность достичь значения интегральной мощности 100 кВт.

В отличие от газовых или традиционных твердотельных лазеров, увеличение мощности диодных лазеров достигают не удлинением резонатора, а увеличением количества излучающих диодов и их рабочей поверхности. Компактность конструкции позволяет встраивать диодные лазеры в

автоматизированные промышленные комплексы. Излучение подобных лазеров с длиной волны в ближнем инфракрасном диапазоне позволяет использовать их как для сварки металлов (сталей, алюминия, титана и их сплавов), так и пластмасс.

Диодные лазеры также используются для повышения эффективности работы АИГ-лазеров – для накачки активных твердотельных элементов вместо традиционных ламп накачки. В результате существенно повышается КПД преобразования электрической энергии в лазерную, увеличивается срок службы лазеров, уменьшаются габаритные размеры лазера (например, габариты лазерного излучателя мощностью 1 кВт уменьшаются до размеров обувной коробки). Такие лазеры называют АИГ-лазерами с диодной накачкой.

Дальнейшим развитием лазерной техники является также создание **волоконных лазеров** с полупроводниковой накачкой, с использованием активных элементов на основе волоконной оптики.

Главная особенность данного лазера в том, что излучение рождается в тонком, диаметром 9...12 мкм, волокне-сердцевине (например, иттербиевом), которое находится внутри кварцевого волокна диаметром 400...600 мкм.

Излучение лазерных диодов накачки вводится в кварцевое волокно и распространяется вдоль всего сложного составного волокна, имеющего длину несколько десятков метров, рис. 4.21. Это излучение оптически накачивает сердцевину, именно в ней на атомах иттербия (Yb) происходят физические превращения, приводящие к возникновению лазерного излучения.

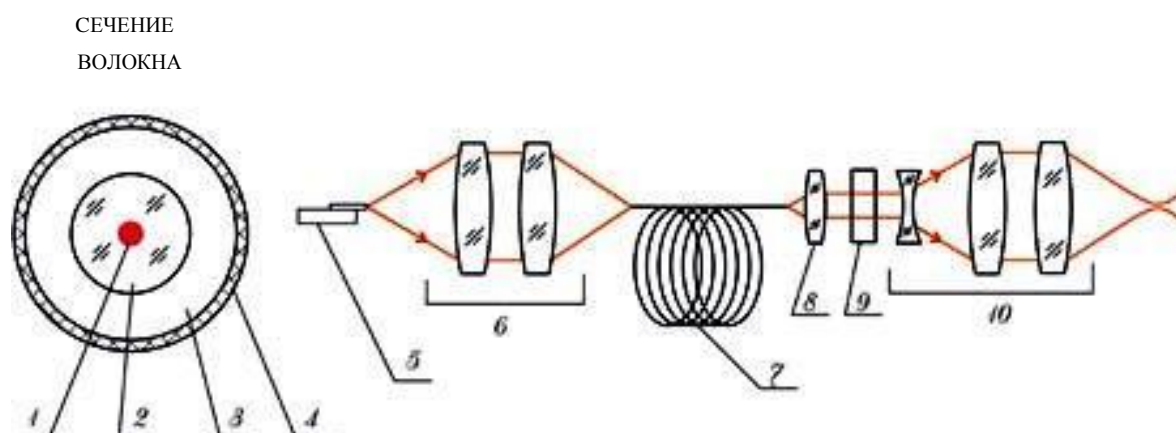


Рисунок 4.21 – Оптическая система с волоконным лазером:

1 – сердцевина, легированная металлом (иттербием); 2 – кварцевое волокно; 3 – полимерная оболочка; 4 – внешнее защитное покрытие; 5 – лазерные диоды оптической накачки; 6 – оптическая система накачки; 7 – волокно (до 40 м); 8 – коллиматор; 9 – модулятор света; 10 – фокусирующая оптическая система

Использование активных элементов на основе волоконной оптики обеспечивает высокое качество луча, КПД преобразования электроэнергии возрастает до 50 %, появляется возможность разработки надежной и компактной конструкции лазера за счет исключения нуждающихся в юстировке оптических приборов. Подобное оборудование представляет собой практически офисную технику, питание которой осуществляется от обычной розетки.

Мощность современных волоконных лазеров достигает 6,5 кВт, в ближайшее время предполагается ее увеличить до 25 кВт.

Поскольку волоконные лазеры работают на длине волны, соизмеримой с длиной волны АИГ-лазеров, они имеют все преимущества своих прототипов, что особенно проявляется при сварке. Минимальный размер пятна фокусировки – до 5 мкм.

Развитие машиностроения и приборостроения на современном этапе определяется дальнейшим стремлением к уменьшению габаритов, миниатюризации выпускаемых изделий, повышению их качества и надежности. При этом значительные усилия направляются на развитие микро-и нанотехнологий обработки материалов, среди которых особое значение приобретает лазерная обработка сверхмощными импульсами, т.к. традиционные методы (микромеханическая обработка, микроштамповка) находятся на предельных возможностях при изготовлении современных миниатюрных и высокоточных изделий.

Степень локализации подводимой лазерной энергии в пространстве зависит от длины волны излучения, а во времени – от длительности лазерного импульса. Поэтому *перспективными направлениями совершенствования лазерной техники, наряду с указанными выше, являются также уменьшение длины волны получаемого излучения и длительности импульсов излучения.*

Сегодня лазерные пучки охватили весь оптический диапазон, в том числе инфракрасную и ультрафиолетовую область спектра. Длина волны

лазерного излучения, зависящая от природы активного элемента, может быть в диапазоне 0,1...1000 мкм. Есть даже лазеры рентгеновского диапазона, обсуждаются идеи гамма-лазера, см. рис. 4.20.

Создание лазеров коротковолнового рентгеновского излучения и гамма-излучения с длиной волны атомного порядка, обладающих высокой проникающей способностью (до 15...20 см в стали) и предельными значениями пятна фокусировки, открывает новые возможности перед лазерной технологией и позволяет повысить возможности сверхпрецизионной обработки, например, при изготовлении микромодулей нового поколения.

Локализация излучения во времени достигается путем сокращения длительности импульса излучения. С помощью обычных источников питания устройств накачки активной среды обеспечивается длительность импульса в пределах от нескольких миллисекунд ( $10^{-3}$  с) до нескольких десятков микросекунд ( $10^{-6}$  с). Используя специальные механические, опто-электрические или акустоэлектрические затворы, можно получать так называемые «гигантские» импульсы (очень высокой пиковой мощности) длительностью от нескольких наносекунд ( $10^{-9}$  с) до нескольких сотен наносекунд.

Для различных целей используются также пикосекундные ( $10^{-12}$  с) и фемтосекундные ( $10^{-15}$  с) импульсы. Совсем недавно появились сообщения о получении импульсов даже аттосекундной длительности ( $10^{-18}$  с).

Локализация в пространстве и во времени лазерной энергии позволяет добиться очень высокой концентрации плотности потока излучения (до  $10^{14}$ ... $10^{26}$  Вт/см<sup>2</sup>), что дает возможность реализовать различные механизмы энергетического воздействия на материал (например, механизм «холодного» разрушения – испарение без плавления) и, таким образом, выполнить разнообразные виды обработки. При этом термическое воздействие локализуется в чрезвычайно малой толщине материала, вплоть до толщины молекулярного или атомарного слоев без нарушения структуры основного материала.

Тенденции развития лазерной техники и технологии, постоянное их совершенствование приводят к тому, что методы обработки материалов с применением лазерного излучения, и прежде всего, лазерная сварка, становятся конкурентоспособными в различных отраслях промышленности. В ряде случаев широкое применение лазерной сварки сдерживается сообра-

жениями экономического характера: стоимость лазеров пока еще достаточно высока, что требует тщательного анализа всех факторов при выборе данного способа.

#### 4.5.2. Основные виды лазерной сварки и области ее применения

Лазерная сварка основана на использовании лазерного излучения в качестве теплового концентрированного источника для локального расплавления соединяемых материалов.

Применяемые для сварки твердотельные и газовые лазеры могут работать в импульсном и непрерывном режиме. Применение импульсных режимов позволяет повысить проплавляющую способность лазерного луча и, следовательно, эффективность процесса лазерной сварки. При импульсном режиме КПД луча в 2...3 раза выше, чем при непрерывном. Однако импульсная сварка требует очень точной наводки луча на стык, более высокого качества подготовки кромок к сварке, а ее скорость в несколько раз уступает скорости сварки с непрерывным излучением.

Лазерную сварку ведут при плотности потока излучения  $\sim 10^6 \dots 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Повышение верхнего предела  $E$  вызывает интенсивное объемное кипение и испарение металла, что используется при размерной обработке. При плотности потока излучения менее  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> лазерное излучение теряет свое основное достоинство – высокую концентрацию энергии.

Существуют следующие основные *виды лазерной сварки*:

- *по технологическому признаку* различают лазерную сварку с глубоким проплавлением (соединяют материалы толщиной более 1 мм, плотность потока излучения  $10^6 \dots 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) и лазерную сварку материалов малых толщин (0,1...0,2 мм, плотность потока излучения  $10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>);
- *в зависимости от конструкции свариваемых изделий, технологических требований* и ряда других факторов возможно осуществление сварки со сквозным проплавлением (применяется при сварке листовых нагруженных конструкций) и без сквозного проплавления (применяется для герметизации или соединения тонких деталей с массивными);
- *по положению в пространстве*, аналогично целому ряду способов сварки плавлением, лазерная сварка может осуществляться в нижнем по-

ложении, вертикальном, горизонтальном, потолочном, как с перемещением луча, так и свариваемого изделия;

- по форме соединения лазерная сварка может быть точечной и шовной, рис. 4.22. С помощью лазерной сварки можно сваривать стыковые, нахлесточные, тавровые и угловые швы, см. рис. 4.22.

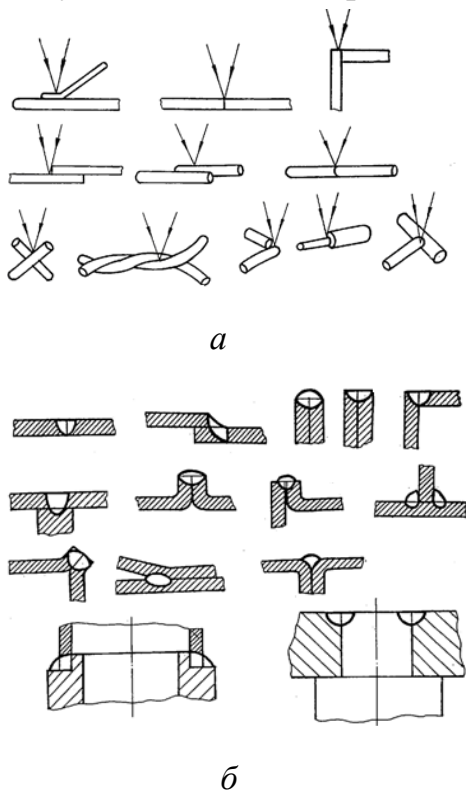


Рисунок 4.22 – Типы соединений, выполняемых точечной (а) и шовной (б) лазерной сваркой

Для каждого из указанных видов лазерной сварки определяется свой оптимальный режим (плотность потока излучения, длительность импульсов или продолжительность времени экспонирования, диаметр сфокусированного излучения, частота следования импульсов и др.).

Благодаря соизмеримым параметрам источника нагрева, см. табл. 4.1, во многих случаях лазерная и электронно-лучевая сварка являются взаимозаменяемыми.

Аналогично ЭЛС, вследствие локальности и высокой интенсивности источника нагрева, лазерная сварка позволяет получать высококачественные сварные соединения, с большим соотношением глубины и ширины проплавления, малым тепловыделением в свариваемых металлах, минимальной зоной термического влияния и минимальной деформацией деталей. Аналогично ЭЛС, лазерная сварка является прецизионной операцией,



в большинстве случаев не требующей последующего устранения остаточных деформаций или механической обработки сварных узлов.

Лазерная сварка при этом имеет определенные преимущества, которые заключаются в следующем:

- ▲ для осуществления лазерной сварки не требуется вакуум, что расширяет технологические возможности лазерной сварки, т.к. позволяет снять ограничения на размеры свариваемых изделий и соединять крупногабаритные конструкции, увеличивает производительность процесса благодаря сокращению времени на откачку камеры, снижает стоимость технологического оборудования; упрощает визуальный контроль;

- ▲ возможна сварка в различных средах – на воздухе, в среде защитных газов – аргона, углекислого газа;

- ▲ лазерный луч легко управляется и регулируется, с помощью зеркальных оптических систем легко транспортируется и направляется в труднодоступные для сварки места;

- ▲ возможно проведение сварки через прозрачные материалы, например, стекло;

- ▲ в отличие от электронного луча и электрической дуги, на лазерный луч не влияют магнитные поля, что обеспечивает стабильное формирование шва;

- ▲ возможно использование лазерного луча, генерируемого из одного источника, на нескольких рабочих местах путем его отклонения и расщепления, рис. 4.23;

- ▲ лазерная сварка отличается гибкостью и легкостью переналадки на обработку других видов материалов и деталей;

- ▲ достоинством лазерной сварки по сравнению с электронно-лучевой является также экологическая чистота процесса; рентгеновское излучение, возникающее при торможении электронного луча, представляет опасность для обслуживающего персонала и требует применения специальных средств защиты;

- ▲ по сравнению с ближайшим аналогом – электронно-лучевой сваркой – лазерная сварка имеет более низкую стоимость оборудования и эксплуатационные расходы;

- ▲ установки для лазерной обработки обычно выпускаются многоцелевыми и могут использоваться для различных видов обработки материалов – сварки, резки, упрочнения, размерной обработки.

Лазерной сваркой можно соединять различные материалы толщиной от нескольких микрон до десятков миллиметров.

Соединяют однородные и разнородные металлы (Au-Ge, Au-Si, Ni-Ta), в том числе с большой разницей в температуре плавления (W-Al, Cu-Ta), металлы с неметаллами (керамикой, стеклом), неметаллические материалы.

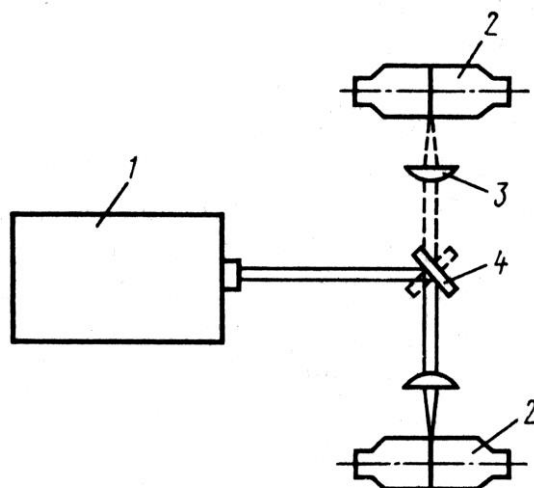


Рисунок 4.23 – Схема сварки одним лазерным источником на нескольких рабочих местах: 1 – лазер; 2 – рабочие места; 3 – фокусирующая оптика; 4 – поворотное отклоняющее зеркало

Основными рациональными областями применения лазерной сварки являются следующие:

***лазерная сварка малых толщин:***

- точечная и шовная сварка деталей электровакуумных приборов из тугоплавких металлов и сплавов;
- точечная сварка в микроэлектронике и радиотехнической промышленности (сварка проводов, элементов микросхем), точном приборостроении, в ювелирном деле, в медицине;

***лазерная сварка с глубоким проплавлением:***

- сварка в труднодоступных местах, а также легкодеформируемых деталей и изделий, требующих минимальной зоны термического влияния и максимальной технологической чистоты;
- производство крупногабаритных корпусных деталей, например, двигателей и обшивки самолетов, автомобилей и судов; валов и осей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, например, карданных валов автомобиля;

- при изготовлении деталей механизмов и машин, состоящих из разнородных материалов;

- для сварки труб, арматурных конструкций и т.д.

Перспективы развития лазерной сварки связаны с преодолением основных недостатков данного процесса – высокими требованиями к подготовке шва и точным позиционированием сварного шва относительно лазерного излучения, а также с увеличением производительности процесса и повышением качества получаемых изделий.

Например, одним из перспективных методов лазерной сварки и в то же время простейшим усовершенствованием стандартного процесса является *лазерная сварка с присадочной проволокой*. Применение присадочной проволоки позволяет заполнять зазоры, что упрощает подготовку свариваемых поверхностей. Кроме того, сварка с присадочной проволокой пригодна для соединения различных материалов с промежуточными слоями, для сварки склонных к образованию трещин материалов.

Другая перспективная технология – *сварка с дистанционным управлением лазерным лучом*, которая реализуется за счет использования длиннофокусных фокусирующих линз, а также за счет расположения оптики на трехкоординатном роботе. При сварке с дистанционным наведением луча повышается точность обработки, существенно сокращается время перемещения от места сварки одного шва к другому.

Весьма перспективны *методы совмещения лазерной сварки с другими сварочными процессами*, например, гибридная сварка лазер-МИГ, т.е. лазерная сварка в сочетании с дуговой сваркой в среде защитных газов. Более детально гибридные технологии будут рассмотрены в п. 4.7.

Перспективы развития лазерной сварки во многом связаны с дальнейшим развитием лазерной техники, см. п. 4.5.1.

## 4.6. Гелиосварка

К лучевым методам сварки относится также *гелиосварка*, основанная на использовании светового луча, созданного не искусственным, а естественным источником света, – Солнцем.

Чтобы служить технологическим источником тепловой энергии, естественный световой поток должен быть сконцентрирован до необходимых размеров и подан в зону сварки. Это так называемые *прямые методы*

*гелиосварки*, когда солнечная энергия используется непосредственно для сварки без каких-либо преобразований.

Наибольшее применение получили универсальные солнечные печи. Слежение за Солнцем в этих устройствах осуществляется с помощью гелиостата (плоского зеркала); отраженный от него луч направляется на концентратор, который обычно выполняется в форме параболоида, в его фокальной плоскости устанавливается технологический модуль со свариваемым изделием. Получают плотность потока излучения до  $1100 \text{ Вт/см}^2$ , что вполне достаточно для сварки стальных пластин толщиной до 2 мм.

К недостаткам прямых методов относят зависимость от погодных и временных условий, сложность регулирования технологических режимов, невозможность создания мощных импульсных режимов в течение коротких промежутков времени.

В основу *косвенных методов гелиосварки* положена процедура промежуточного накопления электрической энергии. В качестве первичных источников, которые преобразуют лучистую энергию потока в электрическую, обычно используют фотоэлектрические преобразователи либо термоэлектрические генераторы.

*Комбинированные методы гелиосварки* предполагают использование устройств на базе объективов или зеркал и термоэлектрических преобразователей.

Т.о., прямые методы используют в качестве источника нагрева непосредственно световой пучок, а косвенные и комбинированные предполагают преобразование энергетического потока. Последние два подхода являются более универсальными, т.к. позволяют реализовать любые технологические процессы сварки (дуговую сварку, электронно-лучевую, лазерную).

Наиболее перспективны подходы, основанные на использовании полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии (солнечных батарей).

На рис. 4.24 представлена схема автономного сварочного комплекса на базе солнечной батареи, которая работает следующим образом: поток солнечной энергии  $N_c$  с помощью солнечной батареи (СБ) преобразуется в электрические сигналы. Энергетический поток, созданный зарядным контроллером ЗК, попадает через коммутатор режимов КР на две аккумуляторные батареи АБ и заряжает их. Аккумуляторные батареи используются

в качестве промежуточного накопителя энергии и питают резонансный преобразователь, обеспечивающий необходимые параметры процесса сварки и его стабильность.

Безусловно, гелиосварка не конкурирует с такими основными лучевыми методами сварки, как электронно-лучевая, лазерная, но в условиях дефицита энергии может в определенных случаях использоваться для сварки металла небольшой толщины для конструкций, эксплуатируемых в условиях статического нагружения.

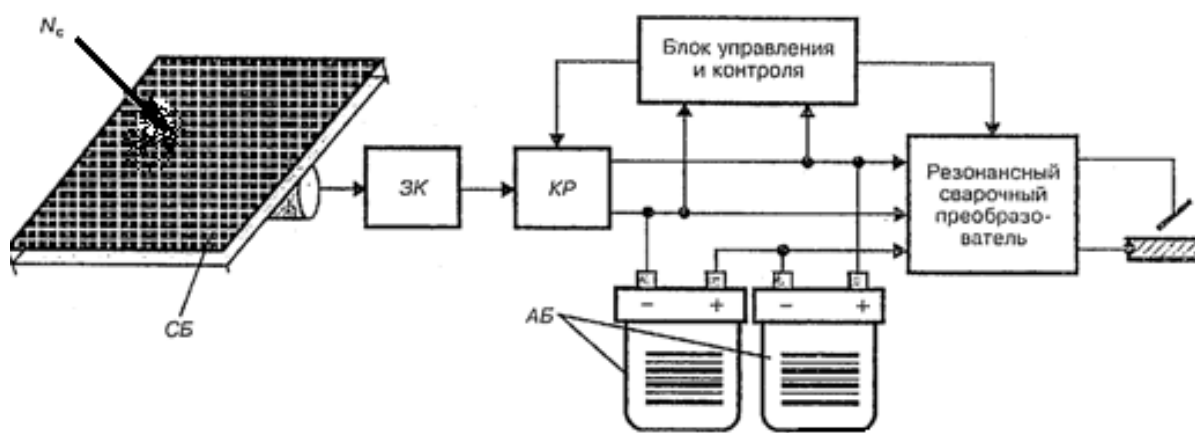


Рисунок 4.24 – Структурная схема автономного сварочного комплекса на базе солнечной батареи

#### 4.7. Гибридные способы сварки

Важной тенденцией современных технологий обработки материалов является их комбинированный характер, т.е. сочетание нескольких технологий в одном процессе. Подобные технологии мы рассматривали в разделах, посвященных перспективным технологиям литья, обработки давлением. Не является исключением и сварочное производство. В последние годы разработано немало комбинированных сварочных процессов, основанных на совместном использовании различных источников теплового воздействия на материал, получивших название «гибридные» способы сварки.

Одной из причин создания гибридных способов сварки (а также резки, модификации поверхности) явилось стремление объединить преимущества и устранить недостатки, присущие различным сварочным техноло-

гиям в отдельности, и прежде всего, повысить производительность процесса и качество сварного шва.

Рассмотрим некоторые из новых гибридных сварочных процессов.

■ **Лазерно-дуговая сварка (лазер – МИГ-сварка).** Основана на совместном использовании в едином процессе лазерного луча и электрической дуги (способ сварки металлическим электродом в защитных инертных газах, см. п. 4.3.3), рис. 4.25.

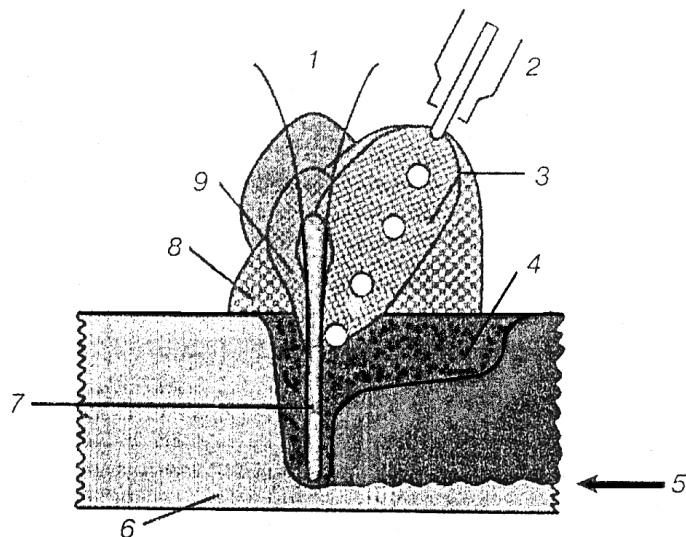


Рисунок 4.25 – Схема процесса лазер – МИГ-сварки: 1 – лазерный луч; 2 – электрод; 3 – дуга; 4 – зона плавления; 5 – направление сварки; 6 – изделие; 7 – паровой канал; 8 – плазма; 9 – пары металла, образующиеся под действием лазерного излучения

Лазерный луч переносит тепло к металлу шва в верхней его части дополнительно к теплу, поступающему от дуги, см. рис. 4.25. Комбинация лазерного и дугового процессов приводит не к простой суперпозиции свойств применяемых в отдельности источников тепла, а связана с рядом особенностей, характеризующих комбинированный процесс в целом.

Например, увеличивается эффективность использования энергии как лазерной, так и дуговой составляющей комбинированного источника тепла, улучшается стабильность горения дуги при высоких скоростях ее перемещения относительно изделия. Обеспечивая практически такое же, как при лазерной сварке, качество сварных швов, гибридная технология позволяет получить значительный выигрыш в производительности и экономической эффективности процесса.

Благодаря комбинации лазерного процесса с дуговым можно получить следующие преимущества:

*а) по сравнению с лазерной сваркой:*

- более высокую стабильность процесса;
- более глубокое проплавление;
- снижение потребления энергии лазерным источником;
- более низкие капиталовложения;

*б) по сравнению с дуговой (МИГ) сваркой:*

- более высокую скорость сварки;
- более низкое тепловложение и соответственно меньшую зону термического влияния;
- более узкие швы.

Лазер – МИГ-сварка позволяет сваривать алюминий, стали, в том числе нержавеющей, толщиной до 4 мм, и уже нашла широкое применение в автомобильной промышленности, например, для получения пространственных конструкций автомобиля, осей и кузовов автомобилей.

Путем комбинации двух процессов недостатки каждого отдельного процесса могут быть скомпенсированы, что приводит к расширению возможностей сварки, улучшению свариваемости и надежности сварных соединений для разных материалов и конструкций. Кроме того, взаимодействие между процессами приводит к повышению КПД гибридного процесса.

■ **Двусторонняя сварка электронным пучком и дуговым разрядом в вакууме.** Данный способ предполагает сквозное проплавление одновременно электронным пучком и дуговым разрядом, воздействующими на свариваемые материалы с двух сторон, рис. 4.26.

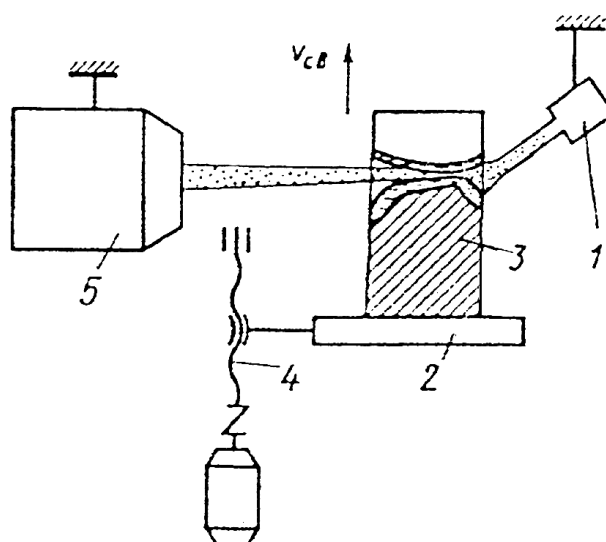


Рисунок 4.26 – Схема двусторонней электронно-лучевой и дуговой сварки:

1 – горелка для дуговой сварки в вакууме; 2 – стол;  
3 – свариваемое изделие; 4 – механизм перемещения; 5 – электронно-лучевая пушка

Создание данного метода обусловлено существующей проблемой формирования корня шва высокого качества. В данной технологии свариваемые кромки проплавляют с лицевой стороны электронным пучком, корень шва – дуговой сваркой в вакууме. Электрическая дуга возбуждается путем подогрева электрода горелки электронным лучом или коротким замыканием.

Взаимодействие двух различных источников теплоты изменяет условия формирования швов таким образом, что лицевая и обратная стороны шва (корень шва) после кристаллизации идентичны. Кроме этого, использование сварочной проволоки различного состава позволяет легировать металл сварного шва; возможно изменение параметров сварки в широких пределах и сварка толщин до 15 мм.

■ **Светолазерная сварка.** Данная технология позволяет интегрировать лучи двух источников излучения – светового (сфокусированного луча от мощного и компактного светового излучателя – кварцевой или металлической дуговой ксеноновой лампы) и лазерного источника.

Излучатель светолазерных установок можно использовать как при ручной эксплуатации, так и при автоматизированной или размещать светолазерный излучатель на промышленных роботах и выполнять работы как в стационарном положении, так и в любых пространственных положениях.

Объединение светового и лазерного луча в одном рабочем фокусе обеспечивает прогрев свариваемого материала до заданных температур.

При наложении температурных полей двух источников нагрева количество (объем) расплавленного материала существенно превышает сумму объемов материала при использовании каждого из источников в отдельности (так называемый синергетический эффект).

При светолазерной сварке обеспечивается высокое качество сварного шва, экономия энергии, увеличение технологических возможностей мало-мощных дешевых лазеров, расширение круга свариваемых материалов.

Способ уже применяется для сварки кузовов легковых автомобилей из алюминиевых тонколистовых сплавов; перспективной также является



область светолазерной сварки тонколистовых алюминиевых сплавов в авиастроении, судостроении, вагоностроении и др.

■ **Плазма – МИГ-сварка.** Данная технология позволяет повысить качество сварного соединения и увеличить скорость сварки по сравнению с дуговой и плазменной сваркой в отдельности. Благодаря плазма – МИГ-сварке удалось решить ряд проблем технологии изготовления конструкций из жаростойких и жаропрочных высоколегированных сталей.

■ **Лазерно-плазменная сварка.** Данный перспективный способ основан на одновременном нагреве сварочной ванны плазменной дугой и лучом лазера, рис. 4.27.

Комбинация данных видов излучений приводит к улучшению пространственной стабилизации пятна дуги на поверхности свариваемого материала, повышению ее устойчивости горения на малых токах и больших скоростях перемещения относительно изделия. Одновременно увеличивается коэффициент поглощения лазерного излучения поверхностью металла, что очень важно для лазеров небольшой мощности. В итоге, с одной стороны, повышается производительность и стабильность плазменной сварки, с другой – повышается эффективность и снижается себестоимость лазерной сварки.

С помощью лазерно-плазменной сварки создана технология лазерно-плазменной порошковой наплавки, для чего разработана специальная конструкция лазерно-дуговых плазмотронов, что позволяет наносить на большие поверхности изделий слои различных износостойких и коррозионностойких сплавов с высокой производительностью и качеством.

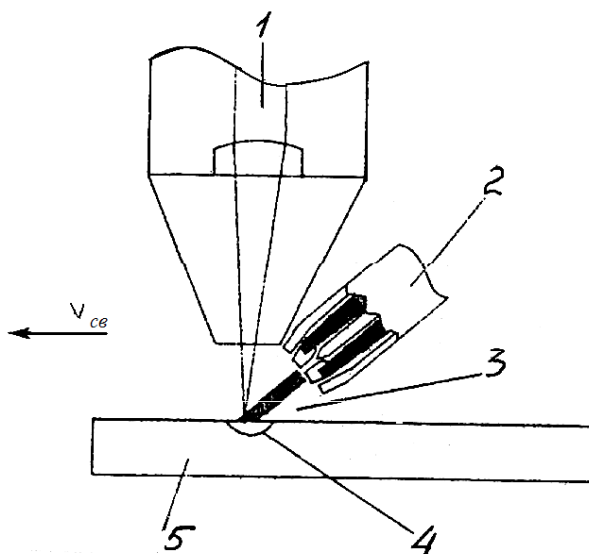


Рисунок 4.27 – Схема комбинированного процесса лазерно-плазменной сварки: 1 – луч лазера; 2 – плазмотрон; 3 – плазменная дуга; 4 – сварочная ванна; 5 – свариваемое изделие

## 4.8. Контроль качества в сварочном производстве

### 4.8.1. Показатели качества сварных соединений

Качество сварных соединений является комплексным понятием и представляет совокупность определенных характеристик. Отдельные характеристики объединяются в группы или показатели качества. Различают следующие группы показателей качества: показатели назначения, надежности, технологичности и др.

**Показатели назначения** обуславливают область практического использования сварного изделия и характеризуются эксплуатационными (служебными) характеристиками изделий – герметичностью, коррозионной стойкостью, износостойкостью и т.д.

**Показатели надежности** характеризуют свойство продукции выполнять заданные функции и сохранять при этом эксплуатационные характеристики в заданных пределах; к этим показателям относятся безотказность, долговечность, ремонтпригодность.

К **технологическим характеристикам** относят вид дефектов в сварном соединении (трещины, поры, непровары, шлаковые включения и др.), их размеры и количество, механические свойства соединения, величину деформаций, уровень остаточных напряжений.

Показатели качества сварных соединений могут быть количественными и качественными.

При определении *количественных показателей* используют измерительные методы, основанные на прямых измерениях контролируемых характеристик, либо расчетные.

*Качественные показатели* определяют с помощью регистрационных методов, основанных на наблюдении и анализе зрительного восприятия информации. Например, степень окисленности поверхности сварного шва определяют по наличию цветов побежалости. При регистрационном методе обычно используют эталоны или специальные стандартные шкалы с бальным способом выражения показателя качества. Так, при оценке степени окисленности сварного шва используют эталоны сварных швов с недопустимой степенью окисления.

Оценку качества продукции производят путем контроля, т.е. проверки соответствия контролируемых показателей заданным требованиям или нормам, установленным нормативно-технической документацией (НТД). НТД включает стандарты, технические условия, чертежи изделий, технологические карты и производственные инструкции.

Выбор необходимой и достаточной номенклатуры показателей качества сварных изделий зависит от специфики и условий эксплуатации сварных изделий (степени ответственности) и устанавливается соответствующими стандартами.

По степени ответственности сварные изделия подразделяют, как правило, на три категории:

■ *1 категория* – особо ответственные сварные изделия, эксплуатируются при переменных нагрузках и в коррозионной среде; разрушение данных изделий может привести к человеческим жертвам. К особо ответственным сварным изделиям относят: сосуды под давлением, грузоподъемные машины, транспортные устройства. Для этих изделий предусмотрено применение нескольких методов неразрушающего контроля и установлен самый высокий уровень требований;

■ *2 категория* – ответственные сварные изделия, разрушение которых вызывает большие материальные потери. Это устройства, встроенные в сложные технологические линии производства продукта, авария которых приводит к остановке всей линии. Применяется один или несколько методов неразрушающего контроля;

■ *3 категория* – малоответственные сварные изделия. В сварных изделиях этой категории не допускаются только сквозные дефекты; изделия контролируют визуально.

Показатели качества в совокупности определяют качество сварных соединений и являются основой для оптимизации технологического процесса, под которой понимают нахождение наилучшего технологического решения осуществления процесса, обеспечивающего качество и надежность сварных изделий.

#### **4.8.2. Методы контроля качества сварных соединений**

Для обеспечения высокого качества сварных соединений необходим контроль качества на всех стадиях проектирования и производства. На

всех этапах контроля необходима также проверка качества самих контрольных операций, метрологическая проверка приборов, соблюдения методики контроля, качества применяемых материалов, квалификации персонала.

Прежде всего, проводится **внешний осмотр** сварных соединений, который предшествует всем другим методам контроля. Это наиболее дешевый, оперативный и достаточно информативный метод контроля, осуществляемый с применением универсального мерительного инструмента, шаблонов, эталонов, луп, эндоскопов (для осмотра швов, не доступных для прямого наблюдения).

При необходимости после внешнего осмотра для контроля качества сварных швов применяют различные методы контроля, которые по воздействию на материал или изделие делят на разрушающие (требуют либо приготовления специальных образцов-свидетелей, моделей, либо проводятся на готовых изделиях, не предназначенных для эксплуатации) и неразрушающие (осуществляются на изделиях, предназначенных для эксплуатации).

Наиболее распространенные методы **неразрушающего контроля** (дефектоскопии): радиационные, акустические, магнитные, проникающими веществами, вихретоковый метод.

▼ **Радиационные методы** основаны на регистрации и анализе ионизирующего излучения при его взаимодействии с контролируемым изделием. Наиболее часто применяются методы контроля прошедшим излучением, основанные на различном поглощении ионизирующего излучения при прохождении через дефект и бездефектный участок сварного соединения, рис. 4.28.

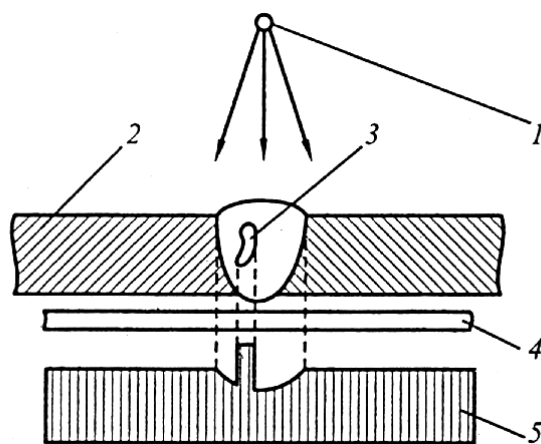


Рисунок 4.28 – Схема радиационного контроля прошедшим излучением:  
1 – источник излучения; 2 – изделие; 3 – дефект; 4 – детектор (пленка);  
5 – плотность излучения

В качестве ионизирующего излучения наиболее широко применяется рентгеновское излучение (электромагнитное излучение с длиной волны  $\lambda \sim 10^{-7} \dots 10^{-14}$  м), которое обладает высокой проникающей способностью и может проходить через достаточно большие толщины конструкционных материалов. Например, дефекты сварного шва могут быть выявлены на стальных заготовках толщиной до 100...200 мм, алюминиевых – до 30 мм, медных – до 25 мм.

Контроль проводится с помощью специальных рентгеновских аппаратов, как стационарных, так и переносных.

Другим достаточно распространенным видом ионизирующего излучения, используемого при контроле сварных соединений, является  $\gamma$ -излучение (электромагнитное излучение с длиной волны  $\lambda < 10^{-10}$  м, возникающее при распаде радиоактивных изотопов). По сравнению с рентгеновскими установками источники  $\gamma$ -излучения более просты, компактны и дешевы. Благодаря портативности аппаратов (радиоактивный изотоп помещается в ампулу, которая сохраняется в специальном футляре-контейнере) метод можно применять в полевых условиях, при монтаже, в частности, для контроля трубопроводов и крупногабаритных резервуаров. Недостатком метода является низкая чувствительность при просвечивании малых толщин (менее 50 мм).

Гораздо реже, при контроле сварных швов изделий большой толщины (стальных – до 450 мм, алюминиевых – до 1800 мм) используется тормозное излучение высоких энергий ( $\lambda = 1 \cdot 10^{-16} \dots 1 \cdot 10^{-12}$  м), обладающее еще большей по сравнению с  $\gamma$ -излучением проникающей способностью. Контроль с использованием тормозного излучения высоких энергий называют бетатронной дефектоскопией.

В зависимости от методов регистрации ионизирующего излучения различают наиболее распространенную радиографию (с фиксацией изображения на пленке или бумаге), а также радиоскопию (изображение наблюдается на экране) и радиометрию (регистрируются электрические сигналы).

▼ **Акустические методы** контроля сварных соединений могут быть пассивными и активными.

Пассивные методы основаны на исследовании упругих волн, возникающих в контролируемом изделии во время или по окончании технологического процесса или при нагружении. Это методы контроля, использующие акустическую эмиссию, а также шумо- и вибродиагностика.

Активные методы основаны на исследовании распространения колебаний, специально вводимых в контролируемое изделие.

Акустические колебания – это механические колебания среды. При акустическом контроле обычно используют колебания с частотой 5...25 МГц, т.е. ультразвукового диапазона, поэтому большинство акустических методов являются ультразвуковыми.

Ультразвуковой контроль качества сварных соединений (активный метод) основан на способности ультразвуковых волн, возбуждаемых ультразвуковым дефектоскопом, отражаться от границы раздела двух сред, в частности, от границы дефекта.

Данным методом выявляют дефекты в металле толщиной 5...3600 мм. Для металла толщиной более 80 мм это наиболее надежный способ. По сравнению с радиационными методами данная технология более экономична, безопасна. Данный метод перспективен и постепенно вытесняет радиационные методы.

▼ **Магнитные методы контроля** применяются для ферромагнитных материалов и основаны на способности магнитного потока рассеиваться в местах расположения дефектов во время намагничивания заготовки.

По приемам регистрации магнитных полей и их неоднородностей магнитные методы контроля подразделяют на магнитопорошковый (на поверхность намагниченной детали наносят ферромагнитный порошок, частицы которого скапливаются над дефектами, рис. 4.29); магнитографический (магнитные поля рассеяния записывают на магнитную ленту); магнитоферрозондовый (используются датчики – феррозонды); индукционный (для регистрации магнитных полей рассеяния используют катушку, которую перемещают вдоль шва с постоянной скоростью) и др.

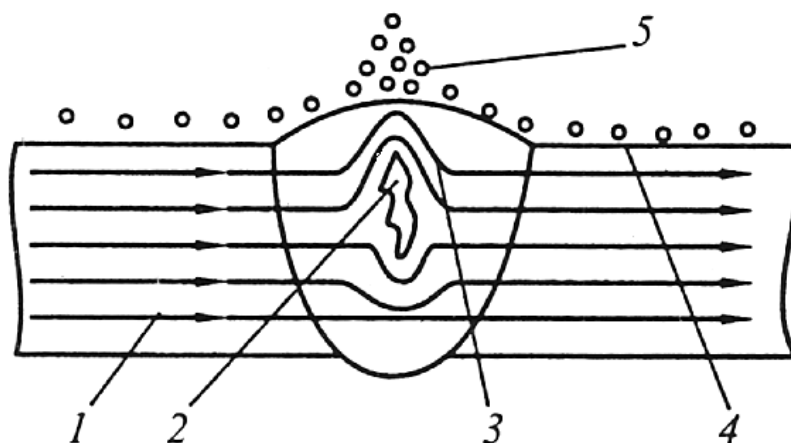


Рисунок 4.29 – Схема магнитного контроля: 1 – магнитное поле; 2 – дефект; 3 – искажение магнитного поля; 4 – магнитный порошок; 5 – скопление порошка

Различные методики магнитного контроля позволяют выявлять несплошности материала (трещины, непровары) с шириной раскрытия до 1 мкм и глубиной от 0,01 мкм до 30 мм.

▼ **Контроль проникающими веществами** включает две группы методов: капиллярные и методы контроля течеисканием.

*Капиллярные методы* основаны на капиллярном проникновении жидкостей (пенетрантов) в дефекты и их контрастном изображении. Применяются для выявления поверхностных дефектов в основном в изделиях из неметаллов и сплавов, для которых невозможно использовать магнитные методы контроля.

В качестве индикаторной жидкости используют смесь керосина со скипидаром с добавкой красителя; в качестве проявителя, в который всасывается индикаторная жидкость, используют раствор каолина в этиловом спирте, порошок (сухой способ), можно использовать растворы люминофоров (дефект будет светиться в ультрафиолетовых лучах).

Капиллярным контролем выявляют дефекты шириной от 1 мкм, глубиной от 10 мкм и длиной от 0,1 мм.

*Методы контроля течеисканием* применяются для обнаружения сквозных дефектов. Для многих изделий (сосуды, замкнутые объемы) важнейшим эксплуатационным требованием является герметичность. Особо высокие требования предъявляются к изделиям, работающим в вакууме.

Сквозные дефекты могут сказываться и на других характеристиках соединения, например, прочности, коррозионной стойкости, электропро-

водности, поэтому метод контроля течеисканием применим и для других изделий, даже для сварных листов.

Методы контроля течеисканием подразделяются на следующие виды:

- гидравлические испытания – в качестве проникающего вещества используется жидкость, обычно вода, подаваемая под давлением, превышающим рабочее в 1,5...2 раза, с одной стороны шва; дефект обнаруживается по появлению жидкости с противоположной стороны шва. При люминесцентно-гидравлическом методе негерметичность шва определяется по течи и свечению индикаторной жидкости; иногда для обнаружения очень мелких дефектов в индикаторную жидкость добавляют радиоактивные вещества и применяют датчики ионизирующего излучения;

- пневматические испытания производятся давлением воздуха, равным 1...1,2 рабочего давления. Испытания под высоким давлением опасны, поэтому их проводят редко. Возможны пневмогидравлические испытания при создании внутри изделия избыточного давления и погружении его в воду;

- вакуумные методы основаны на перепаде давления, создаваемого откачкой воздуха из изделия;

- метод химической индикации течей заключается в том, что на контролируемые стыки сосуда наносят индикаторную массу, пасту или ленту;

- метод контроля керосином (бензином, спиртом) основан на высокой проникающей способности данных веществ и др.

▼ **Вихретоковый метод** контроля качества сварного соединения основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в электропроводящем объекте.

В качестве источника электромагнитного поля чаще всего используется индуктивная катушка, называемая вихретоковым преобразователем.

Особенность вихретокового контроля состоит в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта, поэтому этим методом можно получать хорошие результаты контроля даже при высоких скоростях движения объектов.

Метод применяется для контроля качества электропроводных материалов. Объектами могут быть прутки, проволока, трубы, листы, пластины, покрытия, в том числе многослойные, железнодорожные рельсы, шарики и ролики подшипников, крепежные детали и многие другие промышленные изделия.



Дефектоскопы, реализующие вихретоковый метод, предназначены для обнаружения трещин, расслоений, раковин, неметаллических включений и т.д.

Каждый из приведенных методов контроля качества сварных соединений имеет свои особенности и область применения. Например, радиационные методы используют для контроля любых конструкционных материалов, магнитные – для ферромагнитных (металлов на основе Fe, Ni, Co), вихретоковые – для электропроводных материалов. Радиационный и ультразвуковой методы используют для сварных соединений различной толщины, вихретоковый и магнитный – для малых толщин. При выявлении объемных дефектов рационален ультразвуковой контроль, а плоскостных – ультразвуковой, магнитный и вихретоковый.

Сравнительная оценка (по пятибалльной шкале) разных методов неразрушающего контроля сварных соединений приведена в табл.4.2.

При выборе метода контроля качества следует также учитывать, что выявляемость дефектов зависит от материала, типа соединения, других факторов. Необходимо также ориентироваться на экономическую целесообразность для конкретного изделия: более точные методы стоят намного дороже.

Таблица 4.2 – Сравнительная выявляемость дефектов различными методами неразрушающего контроля

Вид дефекта	Выявляемость дефектов, баллы			
	РД	УЗД	МД	КД
Газовые поры и шлаковые включения	4	4	2	0
Непровары	3	4	3	0
Трещины внутренние	4	5	3	0
Трещины поверхностные и подповерхностные	2	3	4	4

РД – радиационная дефектоскопия;

УЗД – ультразвуковая дефектоскопия;

МД – магнитная дефектоскопия;

КД – капиллярная дефектоскопия.

Некоторые виды оборудования, применяемого для неразрушающего контроля сварных швов, представлены на рис. 4.30.

▼ К новым и перспективным методам неразрушающего контроля относится **метод магнитной памяти материала (МПМ)**, который основан на анализе распределения собственного магнитного поля рассеяния (СМПР) на поверхности изделий.

К достоинствам данной технологии, выгодно отличающим ее от традиционных методов, рассмотренных выше, является возможность интегральной оценки сразу нескольких параметров качества сварного шва в одном испытании (определение зоны концентрации напряжений, наличия дефектов и неоднородности структуры металла и сварных соединений), а также оперативность и компактность установок.

Метод реализуется путем считывания СМПР, отображающего остаточную намагниченность, сформировавшуюся естественным образом в процессе сварки. Формирование магнитной (доменной) структуры в сварных соединениях происходит одновременно с кристаллизацией при остывании металла в магнитном поле Земли и прохождении через точку Кюри под действием напряжений и деформаций, возникающих в процессе сварки. На возникающих дефектах сварки, являющихся концентраторами напряжений, образуются доменные стенки и, соответственно, магнитные полюсы с выходом на поверхность сварного шва в виде СМПР.

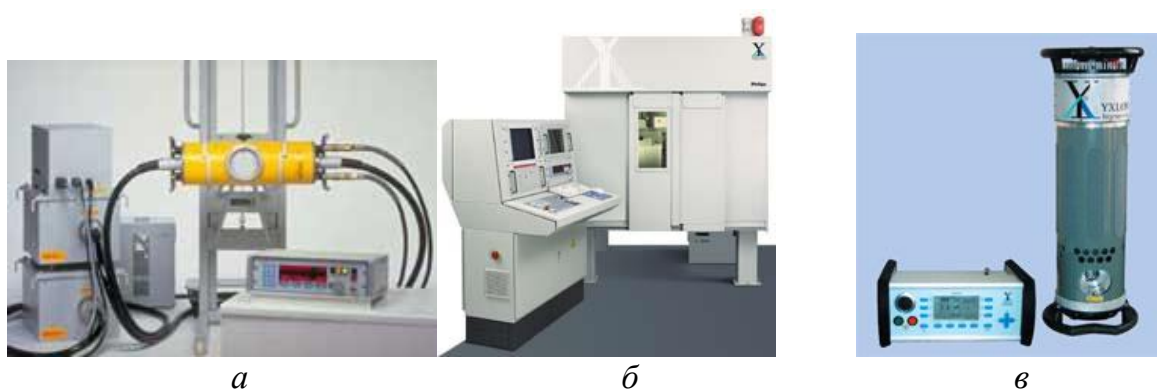




Рисунок 4.30– Оборудование, применяемое для неразрушающего контроля сварных швов: *а* – стационарный рентгеновский аппарат; *б* – рентгенотелевизионная система контроля качества сварных швов; *в* – компактный переносной рентгеновский аппарат; *г* – ультразвуковой дефектоскоп; *д* – магнитный дефектоскоп; *е* – вихретоковый дефектоскоп

Уникальность метода состоит в том, что ни при каких условиях с искусственным намагничиванием в работающих конструкциях такой источник информации, как собственное магнитное поле, получить невозможно. Только в малом внешнем поле, каким является магнитное поле Земли (40 А/м), в нагруженных конструкциях, когда энергия деформации на порядок превосходит энергию внешнего магнитного поля, такая информация может быть получена.

Качество сварного соединения, в частности, распределение остаточных напряжений в сварном шве, по методу МПМ оценивается по характеру распределения магнитного поля рассеяния  $H_p$ , что обусловлено установленной взаимосвязью дислокационных процессов формирования остаточных напряжений с физикой магнитных явлений. Регистрация  $H_p$  легко осуществляется с помощью специальных приборов-магнитометров, рис. 4.31.

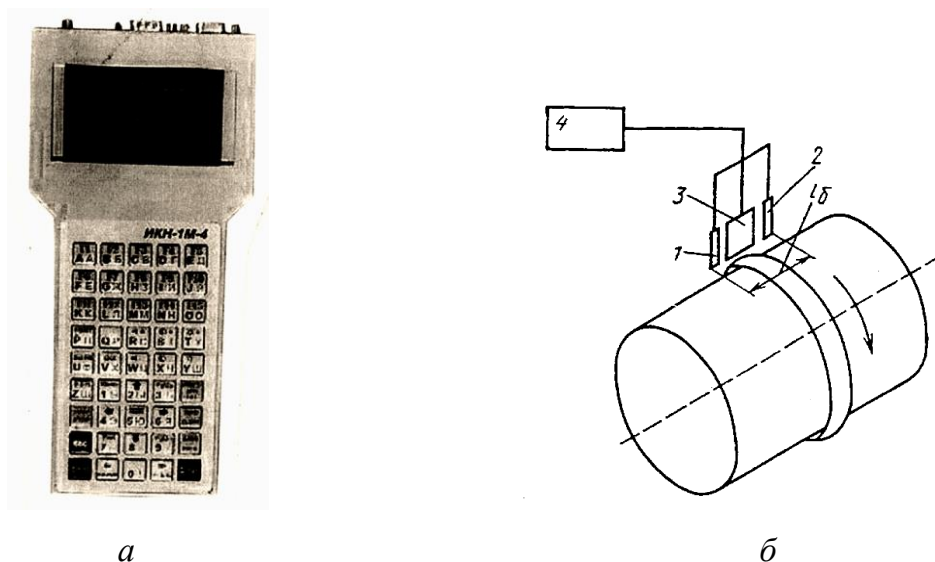


Рисунок 4.31 – Общий вид магнитометра (а) и схема контроля образцов стыковых соединений труб (б): 1,2 – феррозондовые датчики; 3 – механизм одновременного измерения величины магнитного поля и длины контролируемого участка; 4 – компьютерная система обработки;  $l_0$  – изменяемое базовое расстояние между датчиками

Таким образом, появляется возможность путем считывания информации о СМПП с помощью специальных малогабаритных приборов выполнять оценку фактического состояния сварного шва и выявлять на ранних этапах зоны максимальной поврежденности металла.

Контроль методом МПМ осуществляется без специального намагничивания металла и позволяет выполнять экспресс-контроль качества сварных соединений в ручном и автоматическом режиме на различных изделиях (трубах, сосудах, оборудовании и конструкциях) из углеродистых, аустенитных, феррито-аустенитных марок сталей.

Метод магнитной памяти металла по содержанию и физической сущности представляет собой не только принципиально новый метод магнитного неразрушающего контроля, но и открывает новое направление в технической диагностике, т.к. объединяет потенциальные возможности неразрушающего контроля, механики разрушения и металловедения.

Метод уже внедрен на предприятиях Украины, России, Польши, Болгарии, Южной Кореи, Израиля; рассматривается проект международного стандарта *ISO* на этот метод.

Наиболее распространенными методами **разрушающего контроля**, который отличается большей трудоемкостью и материалоемкостью по сравнению с неразрушающим контролем сварных соединений, являются

следующие: механические испытания, металлографические, коррозионные испытания, технологические пробы на свариваемость и т.д.

Методика *механических испытаний* должна учитывать условия эксплуатации изделий и проводиться на стендах, имитирующих условия работы изделия, однако чаще испытания проводятся на стандартных образцах. При механических испытаниях определяют предел прочности металла на растяжение, усталостную прочность при знакопеременных нагрузках, пластичность металла, ударную вязкость, твердость.

*Металлографический анализ* структуры проводится на специально подготовленных шлифах либо на изломах образцов (фрактография).

Для металлографического анализа используют макроанализ (визуально или с помощью лупы), и микроанализ, проводимый на дополнительно полированных микрошлифах с помощью оптических микроскопов при увеличении 50...2000 раз. Для более детального изучения микроструктуры и субструктуры материала сварного шва используют методы электронной микроскопии – просвечивающей и растровой.

Макро-и микрофотографии служат важным документом, свидетельствующим о качестве сварного шва.

## **4.9. Выбор рационального способа сварки**

### **4.9.1. Технологичность сварного соединения**

При проектировании сварных заготовок следует учитывать требования к технологичности их изготовления. Под технологичностью понимают выбор такого конструктивного оформления заготовок, которое обеспечивает удобство и простоту изготовления любыми видами сварки и при различных режимах; автоматизацию и механизацию максимального числа операций технологического процесса; низкую себестоимость процесса сварки за счет экономии сварочных материалов, повышения производительности и высокого уровня механизации, сведения к минимуму искажений формы, вызываемых тепловым и механическим воздействиями при сварке.

Технологичность обеспечивается выбором металла, формы свариваемых элементов и типа соединения, рациональным выбором способа сварки и мероприятий по уменьшению сварочных деформаций и напряжений.

### **4.9.2. Критерии выбора рационального способа сварки**

Выбор рационального способа сварки осуществляется на основе комплексного анализа следующих параметров:

■ *степени теплового воздействия на металл.* Обобщенным показателем степени теплового воздействия на металл является зона термического влияния (ЗТВ), т.е. зона основного металла, в которой в результате нагрева и охлаждения металла при сварке плавлением (а также интенсивной пластической деформации при способах сварки давлением) происходят изменения структуры и свойств. Условно по степени уменьшения ЗТВ основные способы сварки можно расположить в следующем порядке: электрошлаковая, газовая, дуговая автоматическая под флюсом, ручная дуговая, дуговая в защитных газах, контактная, плазменная, электронно-лучевая;

■ *качества сварного соединения,* которое определяется надежностью защиты сварочной ванны и отсутствием дефектов в сварном шве и околошовной зоне. Наиболее эффективна защита при сварке в защитных газах, при сварке в вакууме;

■ *технологическими возможностями.* Критериями данного параметра являются диапазон толщин, конфигурация шва и его положение в пространстве, конструктивные формы свариваемых заготовок. Например, для сварки металла большой толщины (до 2000...3000 мм) применяют электрошлаковую сварку, для сварки малых толщин (до 20 мм) наиболее эффективны электронно-лучевая и лазерная сварка. Электродуговая сварка имеет наиболее широкие возможности при сварке различно ориентированных в пространстве швов;

■ *производительности.* Производительность увеличивается с увеличением тепловой мощности источника и степени концентрации энергии, см. табл. 4.1. По степени увеличения производительности основные способы сварки можно расположить в следующей последовательности: газовая, ручная дуговая, дуговая в защитных газах, автоматическая под флюсом, электрическая контактная, электрошлаковая;

■ *степени автоматизации и механизации.* Наименее совершенными в этом плане являются ручная дуговая сварка электродом с покрытием, газовая. Высокая степень автоматизации реализована в способе автоматической дуговой сварки под флюсом, дуговой в защитных газах, лазерной;

■ *экономичности*, которая оценивается по себестоимости одного погонного метра сварного шва и включает стоимость сварочных материалов, оборудования, табл. 4.3, оплаты труда обслуживающего персонала и др. Наиболее экономичны способы ручной дуговой сварки, газовой; наиболее высока стоимость погонного метра сварного шва, выполненного лазерной, электронно-лучевой сваркой;

■ *экологичности*. К наименее совершенным в этом плане методам относят ручную электродугую сварку электродом с покрытием, газовую. Значительно улучшаются условия труда и уменьшается вредное воздействие на окружающую среду в автоматических способах сварки (например, дуговой автоматической под флюсом); к экологически чистым способам сварки может быть отнесена лазерная сварка.

Таблица 4.3 – Относительные цены сварочного оборудования в различных способах сварки

Способ сварки	Относительная цена
Ручная дуговая сварка	1,0
Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом	2,5
Сварка плавящимся электродом в защитных газах	3,0
Автоматическая дуговая сварка под флюсом	12,0
Электродшлаковая сварка	20,0

#### **4.10. Роль сварки в освоении космического пространства и морских глубин**

Эпохой активного вторжения человека в космос, в глубины морей и океанов стала вторая половина XX века. Несомненно, подобные исследования будут активно продолжаться и в XXI веке.

Дальнейшее проникновение в космос позволит создать такие жизненно важные отрасли, как глобальная информационная система, добыча внеземных ресурсов, космическая биотехнология, космическая энергетика, технология производства новых конструкционных материалов, которые не могут быть получены на Земле, см. п. 1.5, и т.д.

Реально рассматривается задача освоения Луны, ее минеральных и энергетических ресурсов, продолжается штурм Марса.

Чтобы осуществить эти грандиозные планы, нужно строить совершенно новые сооружения, создавать принципиально новые материалы, учитывать специфику условий эксплуатации конструкций – микрогравитацию и вакуум. Важная роль в реализации этих задач отводится сварке и связанным с ней процессам и технологиям.

Говоря о гидросфере, прежде всего, стоит вспомнить, что три четверти поверхности нашей планеты составляют океаны, моря, озера, реки. При этом до недавнего времени человек мог проникнуть лишь в верхние, мелководные зоны Мирового океана. Практическое освоение континентального шельфа началось лишь во второй половине двадцатого века.

Сегодня более 30 % нефти получают со дна морей и океанов, примерно такую же долю составляет объем добываемого на шельфе природного газа. Развитие этой отрасли было бы невозможно без строительства мощных буровых и эксплуатационных платформ, терминалов, обустройства подводных месторождений.

В настоящее время разрабатывается технология строительства и эксплуатации на дне морей и океанов газоперекачивающих и нефтяных станций без непосредственного участия человека. В этой связи возникают чрезвычайно сложные задачи диагностики и ремонта всех подводных сооружений топливно-энергетического комплекса.

Грандиозные достижения достигнуты в этом плане Японией. Здесь на сравнительно мелководном шельфе строятся целые города, при этом широко используются сварные сваи, опоры, платформы, трубопроводы.

Еще один аспект освоения морских глубин связан с проблемой истощаемости минеральных ресурсов на суше и дальнейшим развитием научно-технического прогресса, что, несомненно, приведет к необходимости интенсивной добычи минеральных ресурсов со дна океанов и морей, глубины которых весьма существенны – до 5000 м.

Самостоятельную задачу освоения глубин Мирового океана представляет также подъем затонувших кораблей и других конструкций. Эти огромные «запасы» металла, веками скапливающиеся на дне морей и океанов, могут и должны быть введены в процесс рециркуляции.

Совершенно очевидно, что проблемы освоения гидросферы, так же как и космического пространства, не могут быть решены без широкого



применения разнообразных процессов сварки и сопутствующих технологий – резки, нанесения покрытий. И в XXI веке ожидается проведение больших, чрезвычайной сложности работ в космосе и глубинах Мирового океана, связанных с широким применением сварочных технологий.

Обе технологии – сварку в космосе и гидросфере – объединяет то, что они заведомо должны быть ориентированы на экстремальные условия, принципиально отличные от земных.

Для космоса характерны не только микрогравитация и вакуум, но и термоциклирование, неизбежное при работе на орбите. В гидросфере же приходится иметь дело с непрерывной водной средой и большими гидростатическими давлениями.

Обитание и, главное, работа человека в таких условиях связаны с громадными трудностями, а иногда и просто невозможны. В обоих случаях нужны скафандры и высоконадежные системы жизнеобеспечения.

И в космосе, и в гидросфере возникают трудности со снабжением электроэнергией, особенно если речь идет о длительном потреблении. Для выработки электроэнергии в космических условиях необходимы огромные солнечные батареи и мощные аккумуляторы. Предполагается в будущем использовать и ядерные источники, функционирующие на автономной необитаемой орбитальной станции-платформе.

Немалые трудности представляет и снабжение электроэнергией оборудования, работающего в подводных условиях на больших глубинах. Предпочтительны аккумуляторные батареи, снабженные соответствующими преобразователями энергии. Вполне реально использовать в будущем сверхпроводниковые кабельные линии, соединяющие мощный источник питания на надводном корабле с приемной подстанцией на дне.

Остановимся несколько подробнее на собственно сварочных технологиях, применяемых в космосе и в гидросфере.

#### **4.10.1. Сварка в космосе**

Сварка в космосе отличается необычайно сложными условиями: вакуумом до  $10^{-10}$  Па, большой скоростью диффузии газов, невесомостью и широким интервалом температур (от -150 до 130 °С). Большой градиент температур, преодоление неблагоприятных воздействий космической среды требуют разработки специальных приемов сварки и оборудования, ко-

торое должно отличаться высокой надежностью и безопасностью, иметь небольшую массу, обладать низкой энергоемкостью, быть простым в эксплуатации.

Наиболее перспективной для выполнения сварочных работ в открытом космосе является электронно-лучевая сварка, см. п. 4.4, главным достоинством которой является использование естественного космического вакуума. Возможно применение также диффузионной, контактной, гелиосварки, холодной сварки.

Не исключено, что в недалеком будущем будут созданы образцы лазерных устройств, имеющие высокий КПД и пригодные для космических целей. От электронно-лучевой лазерную сварку отличают, по крайней мере, два существенных преимущества, см. п. 4.5: во-первых, нет высокого ускоряющего напряжения и, во-вторых, может быть применена волоконная оптика. Это значит, что лазер можно устанавливать стационарно и транспортировать световой луч в любую точку орбитальной станции в открытом космосе, а также внутри нее.

Выполнение дуговой и плазменной сварки, особенно при большом объеме сварочной ванны, хотя и перспективно, но в ряде случаев технически затруднено из-за невесомости, когда изменяются условия разделения жидкой, твердой и газообразной фаз, что может привести к появлению пористости в швах, увеличению неметаллических включений и т.д.

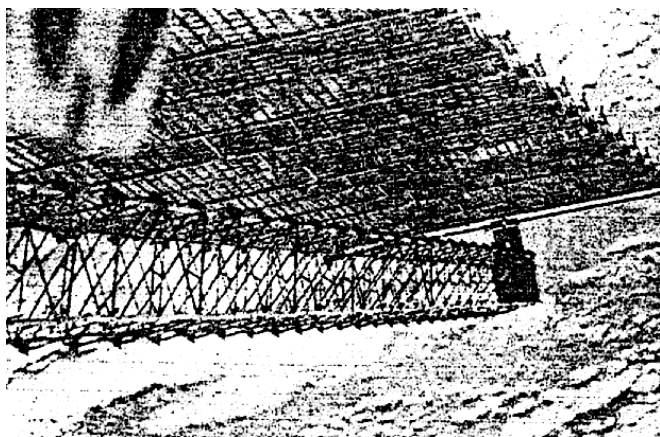
Сварку сегодня можно по праву назвать космической технологией, она широко используется при сборке и монтаже крупных космических кораблей и орбитальных станций, для проведения ремонтно-восстановительных работ долговременных орбитальных космических станций, при ремонте оборудования и аппаратуры космических аппаратов, а также для изготовления материалов и изделий с особыми свойствами, которые не могут быть получены на Земле, для научных целей.

Материалы, свариваемые в условиях космического пространства, – алюминий, титановые сплавы, нержавеющие и жаропрочные сплавы.

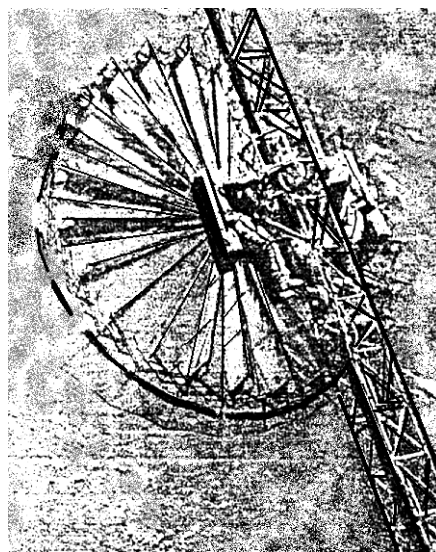
Еще в 1969 г. на борту космического корабля «Союз-6» впервые в мире летчики-космонавты В. Кубасов и Г. Шонин осуществили уникальный эксперимент по сварке электронным лучом, плазмой и плавящимся электродом на установке «Вулкан», созданной в Институте электросварки (ИЭС) им. Е.О. Патона, что положило начало применению сварки для освоения космического пространства и для получения сварных соединений в космосе.

В 1984 г. в ИЭС было создано уникальное оборудование для ручной электронно-лучевой сварки в космосе, используя которое, космонавты С. Савицкая и В. Джанибеков впервые в открытом космосе выполнили процессы сварки, пайки, резки и напыления.

Далее на орбитальной станции «Мир» (1986–2001 гг.) проводились комплексные эксперименты по раскрытию многометровых ферменных трансформирующихся конструкций, доставляемых в космос в компактном виде и собираемых с помощью сварки и пайки отдельных узлов; эксплуатировалась система многоканального раскрытия и складывания солнечных батарей протяженностью 15 м, рис. 4.32.



*а*



*б*

Рисунок 4.32 – Разработанная в ИЭС ферма в составе многоразовой солнечной батареи станции «Мир» (*а*) и раскрытие солнечной батареи на станции «Мир» (*б*)

Учеными ИСМ была также создана многофункциональная платформа, с помощью которой космонавты смогли перемещаться по поверхности станции к любому месту работы; разработан уникальный сварочный аппарат на основе электронно-лучевой технологии для проведения сварочных работ в космосе, который можно использовать как ручной инструмент либо встраивать в механизированные дистанционно управляемые установки.

Ряд технологических операций в космосе может выполняться только при дистанционном управлении рабочими процессами с применением роботов и манипуляторов. Некоторые образцы таких устройств уже действуют на американских шаттлах, на международной космической станции МКС.

Работы, связанные с применением сварки в космосе, продолжают совершенствоваться: оборудование, увеличивается его мощность, изучаются

особенности получения сварных соединений в условиях вакуума и микрогравитации.

#### **4.10.2. Сварка под водой**

В настоящее время применяют следующие основные виды подводной сварки: «мокрую» и «сухую» сварку.

▲ «Мокрая» сварка предполагает непосредственное осуществление сварки в воде.

Например, подводная дуговая сварка основана на способности дуги устойчиво гореть в газовом пузыре, образующемся за счет испарения и разложения воды, а также паров и газов расплавленного металла и обмазки электрода, рис. 4.33.

Газовый пузырь, образующийся вокруг дуги, не только сопутствует процессу горения, но и является необходимым условием ее существования.

Пузырь возникает прежде, чем образуется дуговой разряд, т.е. дуга зажигается в парогазовой атмосфере, а не в воде. Главная причина образования газового пузыря – электропроводность воды и тепло, выделяющееся при разогреве электрода.

Сварка под водой осуществима и в пресной, и в морской воде.

Сварку выполняют в основном на постоянном токе; в качестве источников питания используют сварочные генераторы.

Ручная сварка предполагает, что пространственное управление электрической дугой, а также смена электродов осуществляются вручную.

Сварочный электрод, закрепленный в электрододержателе, находится в руках у водолаза-сварщика; при сгорании электрода сварочный процесс останавливается для замены электрода.

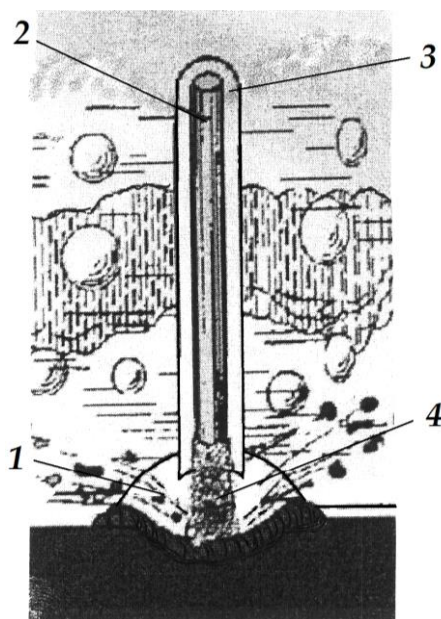


Рисунок 4.33 – Принципиальная схема горения дуги под водой:  
 1 – газовый пузырь; 2 – электрод; 3 – обмазка электрода; 4 – дуга

Достоинствами «мокрой» ручной дуговой сварки являются возможность осуществления сварки в труднодоступных местах без каких-либо дополнительных сооружений или устройств, возможность выполнения различных видов соединений (внахлестку, тавровых, угловых, стыковых) во всех пространственных положениях.

К недостаткам способа относятся невысокие механические свойства шва (в результате взаимодействия с продуктами разложения воды – водородом и кислородом), возможное появление закалочных структур в металле шва (из-за повышенной теплоотдачи), невысокая производительность.

Кроме того, плохая видимость, наличие подводных течений, гидростатическое давление создают неблагоприятные условия как для условий существования дугового разряда, так и для работы сварщика-водолаза, отрицательно сказываясь на качестве швов и производительности процесса.

Более перспективна полуавтоматическая дуговая сварка с использованием самозащитной порошковой электродной проволоки (полого стального электрода, наполненного смесью порошков, которые являются флюсом). В данном способе сочетаются преимущества механизированных способов (механическая подача проволоки позволяет длительное время вести процесс без перерывов) с маневренностью и универсальностью ручной дуговой сварки.

По сравнению с ручной дуговой сваркой при использовании подводной сварки порошковой проволокой в несколько раз повышается производительность, повышается качество и механические свойства сварного шва.

Данный способ применяется при ремонтных работах на корпусах судов, плавучих причальных сооружениях, других гидротехнических объектов, при подъеме судов, аварийно-спасательных работах.

При современном уровне техники дуговая сварка порошковой проволокой мокрым способом осуществляется на глубине до 60 м.

Однако существуют серьезные ограничения по номенклатуре металлов, пригодных для сварки таким способом. Кроме того, с увеличением глубины изменяются свойства дуги (происходит ее сжатие), интенсифицируется взаимодействие расплавленного металла с окружающей средой и становится проблематичным получение качественного сварного соединения. Существуют также ограничения глубины сварки «мокрым» способом, связанные с физиологическими возможностями работы человека в скафандре.

В гидросфере может быть также применена взрывная технология, например, вырезка дефектного участка подводного трубопровода. Опыт применения подобной технологии на глубинах несколько десятков метров уже существует.

Возможно также использование лазерной технологии с применением твердотельного лазера и волоконной оптики – лазер устанавливается на надводном корабле, а световой луч транспортируется по волоконному световоду.

▲ При реализации «сухой» подводной сварки процесс реализуется в локальных и крупногабаритных камерах, где можно создать либо газовую атмосферу, либо вакуум.

При сварке в «сухой» *глубоководной камере* сварка осуществляется при высоком гидростатическом давлении в абсолютно сухой среде, созданной под водой, и сварные швы по качеству не отличаются от сварных швов, полученных на суше.

Глубоководная камера (герметичный барокомплекс) состоит из гидротанка, жилого и шлюзового модулей. Жилой модуль оборудован индивидуальными системами жизнеобеспечения, шлюзовой модуль используется в случае необходимости принять людей или крупные предметы в жилой модуль.

Для сварки в барокамере, вмещающей в себя сварщика и сварной узел, применяют то же сварочное оборудование и материалы, что и в естественных условиях.

Для доставки сварщика-водолаза используются различные методы, одним из распространенных является использование погружаемого аппарата с выходом через шлюзовое устройство. Время пребывания сварщика в барокамере ограничено.

К основным недостаткам «сухой» глубоководной камеры является то, что она очень громоздка, ее сооружение представляет собой длительный, дорогостоящий и сложный процесс, требующий использования вспомогательных судов и плавучих кранов, что, естественно, сказывается на стоимости сварочных работ.

В настоящее время применение глубоководной техники уже возможно на глубинах до 300 м. На глубинах от 300 до 600 м погружение водолазов следует рассматривать как крайнюю необходимость, а работы на глубинах свыше 600 м для человека невозможны, что связано с физиологическим и медицинским барьером. Работы на глубине свыше 600 м должны осуществляться посредством дистанционно управляемых рабочих комплексов, а также подводных аппаратов с нормальным давлением.

Для осуществления некоторых видов гидросварки, например, для ремонта трубопроводов, используют *метод «сухой» глубоководной сварки при помощи легких портативных боксов*, обеспечивающих локализованную сухую газовую среду вокруг свариваемого изделия.

Гидробокс изготавливают из частично или полностью прозрачного материала для возможности наблюдения за дугой и сварочной ванной, он должен плотно прилегать к свариваемому соединению, обеспечивать герметичность. Через основание гидробокса вводится сварщиком-водолазом сварочная головка. Для вытеснения воды из бокса и создания сухой среды в него подается смесь инертных газов под соответствующим давлением.

Контроль за проведением сварки, подача проволоки и другие операции выполняются с помощью находящегося на поверхности пульта управления.

Возможно также осуществление подводной резки материалов, например, при демонтаже конструкций или ремонте. Наибольшее распространение получили способы термической резки – электродуговая, электрокислородная, газокислородная, плазменная.

Безусловно, приведенные выше примеры применения сварки далеко не исчерпывают картину будущего развития данной технологии. Несомненно только то, что сварка и далее будет развиваться и оставаться ключевой технологией для многих отраслей производства, строительства, транспорта, электронной техники и связи, а также медицины.

### **Вопросы для самостоятельного контроля**

1. Какова роль сварки в современном производстве?
2. Укажите основные тенденции развития современного сварочного производства.
3. В чем специфика и задачи сварочного производства Украины?
4. Назовите основные перспективные направления развития электродуговой сварки.
5. На какие группы делят способы дуговой сварки по степени механизации?
6. Как устроены сварочные роботы и какие функции они выполняют?
7. Какие источники питания применяют для электродуговой сварки? Какие из них наиболее перспективны и почему?
8. Каков принцип работы инверторных источников сварочного тока?
9. Какие новые высокоэффективные модификации способа электродуговой сварки Вы знаете?
10. В чем сущность и каковы области применения электронно-лучевой сварки?
11. Как устроена установка для электронно-лучевой сварки?
12. Какие перспективные решения в области техники и технологии электронно-лучевой сварки Вам известны?
13. Как формируется лазерное излучение и каковы его характеристики?
14. Какие основные виды лазеров в зависимости от природы активного элемента Вам известны?
15. В каких направлениях развивается лазерная техника?
16. Опишите основные области применения лазеров в промышленности.
17. В чем особенности и преимущества лазерной сварки по сравнению с другими способами сварки?



18. Каковы основные виды лазерной сварки?
19. Какие области применения являются рациональными для лазерной сварки?
20. Какие новые модификации способа лазерной сварки Вам известны?
21. В чем сущность гелиосварки и где она применяется?
22. Какие Вы знаете гибридные способы сварки и в чем преимущества комбинации различных процессов?
23. Каковы основные показатели качества сварных соединений?
24. Какие группы методов применяют для контроля качества сварных соединений?
25. Какие методы контроля качества сварных соединений относят к неразрушающим? Опишите кратко принцип их реализации и области применения.
26. В чем заключается метод магнитной памяти материала, в чем его особенности по сравнению с традиционными методами?
27. Какие Вы знаете разрушающие методы контроля качества сварного соединения и как они работают?
28. Как осуществляется выбор рационального способа сварки?
29. Опишите возможности применения сварки для освоения космического пространства.
30. В чем специфика подводной сварки?

## Список литературы

1. Андриевский Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы // Российский химический журнал. – 2002. – т. XLVI, №5, с. 50-56.
2. Бакулин А.М., Ульянов В.А., Афанасьев А.П., Гушин В.Н. Современные технологии изготовления литейной оснастки // Литейное производство. – 2001. – № 2, с. 18-19.
3. Батышев А.И. Штамповка жидкого металла: традиционные и нетрадиционные процессы // Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. – № 34, с. 7-11.
4. Бейгельзимер Я.Е., Сынков С.Г., Орлов Д.В., Решетов А.В. Винтовая экструзия // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2004. – № 6, с. 15-22.
5. Бернадский В.Н., Маковецкая О.К. Сталь и алюминий – основные конструкционные материалы сварочного производства (Обзор) // Технология машиностроения. – 2005. – № 2, с. 5-20.
6. Бирбираер Р.А., Колмаков А.Е., Столповский В.В. Технология быстрого прототипирования в современном литейном производстве точных заготовок // Литейное производство. – 2004. – № 4, с. 11-14.
7. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000.
8. Васильев В.А., Морозов В.В., Максимов Н.М. Теория и технология изготовления отливок методом *RP* // Литейное производство. – 2004. – № 4, с. 5-8.
9. Витязев Ю.Б. Технология стереолитографии // Мир техники и технологий. – 2002. – № 3, с. 40-41.
10. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. – М.: ЗАО «ТИССО», 2004.
11. Волчок И.П., Беликов С.Б., Король Т.В. Техничко-экономические аспекты производства стали в Украине // Мир техники и технологий. – 2002. – № 6, с. 7-9.
12. Гини Э.Ч. Технология литейного производства: Специальные виды литья. – М.: Машиностр., 2005.
13. Девятых Г.Г., Бурханов Г.С. Высокочистые тугоплавкие и редкие металлы. – М.: Наука, 1993.
14. Дилтай У., Штайн Л., Весте К., Райх Ф. Состояние и перспективы

применения высокоэффективных сварочных технологий // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10-11, с. 151-157.

15. Зубков Н.Н. Совмещение процессов резания и обработки давлением в новом методе формообразования развитых поверхностных структур // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2002. – № 10, с. 17-34.

16. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления: Монография / Под ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2002.

17. Использование сверхпластичности в обработке металлов давлением / Г.Б. Строганов, И.И. Новиков, В.В. Бойцов, В.Ф. Иширков. – М.: Машиностр., 1989.

18. Караник Ю.А. Новые ресурсосберегающие технологии литья точных заготовок изделий машиностроения // Литейное производство. – 2004. – № 2, с. 23-25.

19. Кидзи Н., Кобаки К., Исии Д., Ямаока Х. Разработка высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10-11, с. 59-63.

20. Клягин Г.С., Ростовский В.И., Мороз Е.О., Кравченко А.В. Оптимизация рециркуляции отходов в черной металлургии Украины // Металл и литье Украины. – 2001. – № 3-4, с. 36-38.

21. Коваленко В.С. Лазерная технология: Учеб. – К.: Высш. шк., 1989.

22. Коваленко В.С. Лазерная технология на новом этапе развития // Автоматическая сварка. – 2001. – № 12, с. 4-10.

23. Коваленко В.С. Микро- и нанотехнологии обработки сверхмощными лазерными импульсами // Мир техники и технологий. – 2004. – № 11, с. 40-42.

24. Композиционные материалы: Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса. – К.: Наукова думка, 1985.

25. Косторнов А.Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2-х томах. – К.: Наукова думка, 2002.

26. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учеб. для вузов. – М.: Мир, ООО Изд-во АСТ, 2003.

27. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – С.-П.: Изд. Дом Питер, 2004.

28. Лякишев Н.Н., Николаев А.В. Металлургия стали: особенности производства в XX в., проблемы и прогноз дальнейшего развития // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10-11, с. 40-47.

29. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: Учеб. пособие для студентов вузов / Под ред. В.С. Чередниченко. – М.: Омега-Л, 2006.
30. Материаловедение: Учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И., Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
31. Материаловедение и технология металлов: Учеб. для студентов машиностроительных специальностей вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др.; Под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высш. шк., 2002.
32. Москалев В.Г., Фомин П.Ю., Тубалов Н.П. Применение изделий из СВС-материалов в литейном производстве // Литейное производство. – 2004. – № 3, с. 25-28.
33. Нанотехнология в ближайшем десятилетии / Под ред. М.С. Роко, В.С. Уильямса, П. Аливисатоса. – М.: Мир, 2002.
34. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; Под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностр., 2005.
35. Осипова Л.И., Малышев К.К. Современный уровень чистоты металлов // Труды 12-го Международного симпозиума “Тонкие пленки в электронике”. – Харьков: ФТИ, 2001. – с. 17-21.
36. Остапчук М.В., Рибак А.І. Система технологій (за видами діяльності): Навч. посібник. – К.: ЦУЛ. – 2003.
37. Патон Б.Е., Г.И. Лесков. Основы технологии электронно-лучевой сварки (Обзор) // Автоматическая сварка. – 2003. – № 12, с. 23-31.
38. Патон Б.Е. Сварка. Виды и способы. Состояние сварочного производства // Мир техники и технологий. – 2002. – № 5, с. 14-17.
39. Перевезенцев В.Н., Свирина Ю.В. Высокоскоростная сверхпластичность микрокристаллических сплавов в условиях локального плавления границ зерен // ЖТФ. – 1998. – т. 68, № 12, с. 38-42.
40. Повстен В.О., Посвятенко Е.К. Фізичні основи та джерела живлення зварювальної дуги: Навч. посібник. – К.: Арістей, 2004.
41. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысльский и др.; Под ред. И.М. Федорченко. – К.: Наукова думка, 1985.
42. Прехтль М., Ниблинг Ф., Собозик С.М., Отто А., Гейгер М., Бейн И. Интеллектуальная оснастка при литье в кокиль и литье под давлением // Литей-

ное производство. – 2005. – № 2. с. 23-27.

43. Раков Э.Г. Нанотрубки и фуллерены: Учеб. пособие. – М.: Университетская книга, Логос, 2006.

44. Сверхпластическая формовка конструкционных сплавов / Под ред. Н.Пейтона, К. Гамильтона. – М.: Металлургия, 1985.

45. Семенов Б.И., Иванова В.С. Концепция и средства управления формированием кристаллического строения отливок в новых методах литья // Литейное производство. – 2001. – № 5, с. 20-25.

46. Специальные способы литья: Справочник / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич. и др.; Под общ. ред. В.А. Ефимова. – М.: Машиностр., 1991.

47. Таран Б.П., Витязев Ю.Б., Тринева Т.Л. Реальное применение стереолитографии в литейном производстве // Процессы литья. – 2003. – № 4, с. 44-46.

48. Технологические лазеры: Справочник. В 2-х томах / Под ред. Г.А. Абилюсеева. – М.: Машиностроение, 1991.

49. Технология конструкционных материалов: Учеб. для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркин и др.; Под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностр., 2004.

50. Харрис П. Углеродные нанотрубки и родственные структуры. Новые материалы XXI века. – М.: Техносфера, 2003.

51. Химия синтеза сжиганием / Под ред. М.Коидзуми. Пер. с яп. – М.: Мир, 1998.

52. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка. О.І. Променеві методи обробки: Навч. пос. – К.: Кондор, 2004.

53. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А. Сверхпластичность: материалы, теория, технология. – М.: Эдиториал, 2005.

54. Шишаков В.Г., Гончаров С.Н., Шишаков Р.В. Интенсивное пластическое деформирование выдавливанием // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2004. – № 3, с. 31-33.

55. Яскевич И.А. Литейное производство: высококачественные отливки на основе эффективных технологий: Обзор // Литейное производство. – 2004. – № 5, с. 27-31.

56. Awasthi K., Srivastava O. Synthesis of carbon nanotubes // J. Nanosci. Nanotechnol. – 2005. – V. 5, N 10, P. 1616-1636.

57. Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. – New York:

American Scientific Publishers, 2004.

58. Cerwick H. Tandem MAG welding with the PZ 6105 R. // Svetsaren, – 2000. – V. 54, N 1, P. 37.

59. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta Materialia. – 2000. – V. 48, N 1, P. 1-29.

60. Harris P.J.F. Carbon nanotube composites // Int. Mater. Rev. – 2004. – V. 49, N 1, P. 31-43.

61. Implications of Nanoscience and Nanotechnology / Eds. M.C.Roco, W.S. Bainbridge: Kluwer Acad.Publ., 2001.

62. Ivanov K.V., Grabovetskaya G.P., Kolobov Yu.R., Kieback B., Weissgaerber Th. Combined use of powder metallurgy technologies and methods of severe plastic deformation to obtain advanced nanostructured materials // Powder Metallurgy Progress. – 2002. – V. 2, N 2, P. 243-250.

63. Kieback B., Ivanov K.V. et.al. The structure and microhardness evolution in submicrocrystalline molybdenum processed by severe plastic deformation followed by annealing // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2003. – V. 21, P. 69-73.

64. Lundin M., Tandem Wire MAG welding of C-Mn Steels. – SIMR Joining Technology Centre. – SIMR, NIM. – 2000, P. 549.

65. Nanostructured Materials. Science and Technology. – Proc. of NATO ASI // Ed. by G.M.Chow and N.I.Noskova. – Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad.Publ. – 1998. – V. 50, P. 457.

66. Rapid Prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography / Ed. P.F. Jacobs. – SME, Dearborn, 1992.

67. Segal V. Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear // Materials Science and Engineering. – 2002. – V. 338, P. 331-344.

68. Sherby O.D., Wadsworth J. Superplasticity – Recent + advanced and future directions // Progress in Materials Sciences. – 1989. – V. 33, P. 169-221.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Перспективные направления производства материалов.....</b>	<b>5</b>
1.1. Совершенствование структуры мировой черной металлургии. Структура сталеплавильного производства Украины.....	5
1.2. Бесчугунное производство стали.....	10
1.3. Перспективы производства цветных металлов. Цветная металлургия Украины.....	13
1.4. Получение высокочистых металлов и их применение в промышленности.....	20
1.5. Перспективные технологии металлургического производства...	27
1.6. Методы производства композиционных материалов.....	30
1.7. Наноматериалы и нанотехнологии.....	39
1.7.1. Структурная зависимость свойств нанокристаллических материалов.....	43
1.7.2. Методы получения наноматериалов.....	47
1.7.3. Углеродные наноматериалы.....	55
1.8. Ресурсосбережение в металлургическом производстве и рециркуляция металлов.....	66
1.9. Решение экологических проблем в металлургии.....	70
Вопросы для самостоятельного контроля.....	71
<b>2. Перспективы развития литейного производства.....</b>	<b>73</b>
2.1. Структура современного литейного производства.....	73
2.2. Технологии точного литья.....	76
2.2.1. Литье под давлением.....	76
2.2.2. Литье по выплавляемым и газифицируемым моделям.....	77
2.3. Применение самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в литейном производстве.....	80
2.3.1. Сущность и механизм СВС-процессов.....	80
2.3.2. СВС-литье и его практическая реализация для получения изделий машиностроения.....	84

2.3.3. Использование самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в технологии литья по газифицируемым моделям.....	85
2.4. Технологии ускоренного прототипирования ( <i>Rapid Prototyping</i> ) в современном литейном производстве.....	88
2.4.1. Сущность процессов ускоренного прототипирования .....	88
2.4.2. Изготовление литейной оснастки с помощью технологий ускоренного прототипирования.....	96
2.4.3. Создание «интеллектуальной» оснастки.....	103
2.5. Управление формированием структуры отливок.....	105
2.5.1. Получение отливок методом направленной кристаллизации.....	105
2.5.2. Управление формированием кристаллического строения отливок в технологиях рео- и тиксолитья. «Интеллектуальные» материалы.....	113
2.6. Способы литья с непрерывным процессом формирования отливки.....	117
2.6.1. Непрерывное литье и перспективы его развития.....	117
2.6.2. Электрошлаковое литье.....	123
2.7. Выбор рационального способа изготовления отливок.....	125
2.7.1. Требования к отливкам.....	125
2.7.2. Сравнительная характеристика способов литья и рекомендации по выбору рационального способа.....	127
2.8. Перспективы развития литейного производства Украины.....	129
Вопросы для самостоятельного контроля.....	133

### **3. Перспективные направления обработки металлов**

давлением.....	135
3.1. Сверхпластичность и ее использование в процессах ОМД.....	135
3.1.1. Сущность явления сверхпластичности. Основные типы сверхпластичности.....	135
3.1.2. Применение эффекта сверхпластичности.....	138
3.2. Особенности жидкой и полужидкой штамповки.....	147



3.3. Использование методов интенсивной пластической деформации при получении заготовок из наноструктурных материалов .....	154
3.4. Технологии совмещения процессов ОМД с другими процессами формообразования.....	159
3.4.1. Ультразвуковая обработка давлением.....	159
3.4.2. Деформирующее резание.....	162
3.5. Техничко-экономические показатели способов ОМД и критерии выбора рационального способа .....	168
3.5.1. Конструктивно-технологические признаки детали, определяющие технологию ее получения методом ОМД.....	168
3.5.2. Основные технико-экономические показатели процессов ОМД.....	170
3.6. Украинский рынок готового проката черных металлов.....	171
3.6.1. Производство проката черных металлов в Украине.....	171
3.6.2. Потребление готового проката черных металлов в Украине.....	175
Вопросы для самостоятельного контроля.....	178
 <b>4. Сварка – высокоинновационный технологический процесс промышленности XXI века .....</b>	<b>180</b>
4.1. Состояние и перспективы развития мирового сварочного производства.....	180
4.2. Сварочное производство Украины.....	184
4.3. Перспективы развития электродуговой сварки.....	186
4.3.1. Развитие механизированных способов дуговой сварки. Роботизация в сварочном производстве.....	186
4.3.2. Перспективные виды источников питания для дуговой сварки. «Интеллектуальная дуга».....	192
4.3.3. Новые высокоэффективные модификации способа электродуговой сварки.....	197
4.4. Электронно-лучевая сварка и ее развитие.....	201
4.5. Лазерная сварка и перспективы ее совершенствования.....	210
4.5.1. Лазерная техника .....	210
4.5.2. Основные виды лазерной сварки и области ее применения....	218
4.6. Гелиосварка.....	222

4.7. Гибридные способы сварки.....	224
4.8. Контроль качества в сварочном производстве.....	228
4.8.1. Показатели качества сварных соединений.....	228
4.8.2. Методы контроля качества сварных соединений.....	230
4.9. Выбор рационального способа сварки.....	239
4.9.1. Технологичность сварного соединения.....	239
4.9.2. Критерии выбора рационального способа сварки.....	240
4.10. Роль сварки в освоении космического пространства.....	242
4.10.1. Сварка в космосе.....	244
4.10.2. Сварка под водой.....	246
Вопросы для самостоятельного контроля.....	250
<b>Список литературы.....</b>	<b>252</b>

Навчальне видання

ПУПАНЬ Лариса Іванівна  
КОНОНЕНКО Володимир Іванович

## **ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТА ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ**

Навчальний посібник  
для студентів усіх спеціальностей  
денної та заочної форм навчання

Російською мовою

Відповідальний за випуск А.І. Грабченко

Роботу до видання рекомендував О.М.Шелковой

В авторській редакції

План 2007 р., поз. 24

Підп. до друку 11.04.07 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.  
Riso-друк. Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 15,7. Обл.-вид. арк. 18,7.  
Наклад 100 прим. Зам. № . Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ"ХП".

Свідоцтво про реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---

Центр оперативної поліграфії.

Свідоцтво про державну реєстрацію № 04058841 від 06.12.2001 р.